

Yüksek Gerilim Hatlarının Radyo Girişim Gerilimi Düzeyi

Özcan Kalenderli
İstanbul Teknik Üniversitesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü
80626 Maslak, İstanbul
ozcan@elk.itu.edu.tr

Özet: Bu çalışmada, yüksek gerilim hatları çevresindeki elektromanyetik alanların yük benzetim yöntemi ile hesabı açıklanmış, 380 kV'luk bir hat için yapılan hesaplar verilmiştir. Çalışmanın deneysel bölümünde laboratuvar da hat modeli çevresinde ve İstanbul Kağıthane'de açık havada gerçek 380 kV'luk bir hat çevresinde radyo girişim gerilimi düzeyini belirlemek amacıyla yapılan elektrik ve manyetik alan ölçmelerinin sonuçları verilmiştir. Hesaplanan ve ölçülen elektromanyetik alan değerlerinin hattan uzaklıkla azaldığı görülmüş, alan düzeyleri hakkında bilgi verilerek elektromanyetik etkileşimin değerlendirilmesi için katkıda bulunulmuştur.

1. Giriş

Yüksek gerilim hatları gereksinimimiz olan elektrik enerjisini taşıyan yapılardır. Gereken büyük miktardaki elektrik enerjisini iletebilmek, enerji kaynakları ile tüketim merkezleri arasındaki uzun mesafelerde gerilim düşümünü karşılayabilmek amacıyla yüksek gerilim hatlarının kullanımı zorunludur. Bu hatlar, taşıdıkları yüksek gerilimler ve akımlar nedeniyle çevrelerinde yüksek elektrik ve manyetik alanlarının kaynağıdır. Yüksek gerilim uygulanmış, yerden ve diğer hatlardan uzaklıklarına göre yarıçapları çok küçük olan hatlar üzerindeki yüksek elektrik alanları, iletken çevresindeki havanın iyonize olmasına ve korona adı verilen kısmi boşalmalara sebep olur. Yüksek gerilim hatları üzerindeki korona, elektriksel güç kaybı yanında, duyulur düzeyde sesi, görünür düzeyde ışığı, oluşturduğu ozon nedeniyle kokusu, ve nemle beraber meydana getirdiği asit etkisiyle tanındığı kadar, çevrede oluşturduğu radyo ve televizyon parazitleri (girişimleri) ile de etkilidir.

Korona, hattın yapısı, yüzeyi, hava koşulları, uygulanan gerilim gibi pek çok etkene bağlıdır. Hatlar bu durum dikkate alınarak tasarlanır ve gerçekleştirirler. Ancak hava koşulları olarak karşılaşılan, yağmur, kar, buzlanma, kırağı, nem, toz, rüzgar gibi birçok etken koronanın ve dolayısıyla belirtilerinin ve etkilerinin artmasına sebep olur. Korona özellikle çok yüksek gerilimlerde daha önem kazanır. Bu gerilim düzeylerinde korona etkisini azaltmak amacıyla iletken yapı düzeni demet şeklinde olduğu için adına demet iletkenler denilen iletken yapıları kullanılır. Demet iletkenlerde, hattaki her bir faz için tek bir iletken yerine kesiti tek iletkene eşit birden fazla, örneğin iki, üç, dört... iletken kullanılır. Genellikle bir çember çevresine eşit aralıkla yerleştirilen demet iletkenler, iletken çapını görünür olarak büyütür ve üzerindeki alan şiddetini azaldığı için korona azalmış gibi etki eder. Bu da hattın radyo ve televizyon girişim gerilimi düzeyini düşürür. Koronadan yayılan elektromanyetik dalganın 0,15-30 MHz aralığında olan bölümü radyo frekansları aralığına düştüğünden koronanın yarattığı bu girişime radyo girişim gerilimi (Radio Interference Voltage (RIV)) denir. Koronanın televizyon girişimi ise (Television Interference (TVI)) yakın alıcılarda kendini gösterir.

Bu çalışmada, Türkiye'de çok yüksek gerilim kademesi olarak kullanılan 380 kV'luk, ikili ve üçlü demet iletkenli, tek devre ve çok devre yüksek gerilim hatları çevresindeki değişik frekanslarda ve hava koşullarındaki radyo girişim gerilimi düzeylerinin hesabı ve sonuçları sunulmuştur.

2. Yüksek Gerilim Hatlarının Çevresindeki Alanlar

Enerjili bir hattın çevresinde elektromanyetik alanın varlığı kaçınılmazdır. Hattın gerilimi veya potansiyeli elektrik alanının, hattan akan akım da manyetik alanın kaynağıdır.

Elektriğin vazgeçilmez bir enerji kaynağı olması ve artan enerji gereksinimi, bu gereksinimi karşılama sorununu yaratmaktadır. Enerji kolay üretilebileceği yerde üretilip, gereksinimi olan yerlere iletilir ve dağıtılır. Bu durum enerjinin üretildiği yerler ile tüketildiği yerler arasında büyük uzaklıkların ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Hem daha büyük güçleri iletmek hem de gerilim düşümü sorunundan etkilenmemek için yüksek gerilimli enerji iletim hatları kullanılmaktadır. Bu hatların tasarımında elektrik, mekanik, ekonomi, çevre gibi pek çok yan göz önüne alınmaktadır. Bu hatlar elektriksel yalıtımı yeterli, öncelikle elektriksel atlama olmayacak açıklıklara sahip

olacak şekilde kurulurlar. Hatların elektromanyetik etkileşimi genelde geri planda kalır. Günümüzde çevre bilincinin giderek artması ve özen gösterilmesi bu etkileşimin özellikle insanlar açısından önemini öne çıkarmaktadır.

Bu çalışmada da ülkemizde bulunan yüksek gerilim hatları çevresindeki yüksek frekanslı elektromanyetik alan düzeyleri hakkında bilgi vermek amacıyla yapılan kuramsal ve deneysel çalışma ve sonuçları açıklanmıştır.

3. Yük Benzetim Yöntemi

Yük benzetim yöntemi, ilkesi iletken yüzeyindeki gerçek elektriksel yüklerin yarattığı alan yerine, iletken içine yerleştirilen ve benzetim yükü olarak adlandırılan noktasal, çizgisel veya başka tip yüklerin oluşturduğu alanın hesabına dayanan bir sayısal yöntemdir. Yöntemde benzetim yüklerinin tipi, sayısı ve yeri benzetimin doğruluğunu ve uygulamasını belirlemektedir. Genelde problemin geometrisine uygun elektriksel yüklerle çalışmak çözümlemede kolaylık sağlar. Yüklerin değerleri, iletken yüzeyinde alınan ve sınır noktası adı verilen belirli sayıdaki noktada potansiyelin iletkenin bilinen potansiyeline eşit olması koşulundan gidilerek bulunur. Bu koşuldan yararlanarak yazılan

$$[p]_{n \times n} \cdot [q]_{n \times 1} = [V]_{n \times 1} \quad (1)$$

lineer denklem sisteminden yükler hesaplanır. Bu denklemde $[p]$ potansiyel katsayıları matrisi, $[q]$ bilinmeyen yüklerden oluşan vektör, $[V]$ sınır potansiyellerini içeren vektör, n yük sayısıdır. Bu denklemde yüklerin değerleri belirlendikten sonra herhangi bir noktadaki potansiyel ve elektriksel alan bu yüklerin o noktada meydana getirdikleri potansiyel ve alanların toplamından kolayca hesaplanabilir. Örneğin bir sonsuz çizgisel yükün, herhangi bir $A(x_A, y_A)$ noktasında meydana getirdiği potansiyel,

$$V_A = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r_0}{r_A} \quad (2)$$

dir. Burada ϵ ortamın dielektrik sabiti, r_0 yükün, potansiyeli sıfır olan en yakın noktaya olan uzaklığı; r_A yükün, potansiyeli hesaplanacak noktaya uzaklığıdır.

Benzetim yükünün bulunduğu yerin koordinatları x_q, y_q ile gösterilirse, A noktasındaki elektrik alan şiddetinin x ve y bileşenleri ve mutlak değeri ise

$$E_{xA} = q(x_A - x_q) / r_A^2 \quad \text{ve} \quad E_{yA} = q(y_A - y_q) / r_A^2 \quad (3)$$

$$E_A = \sqrt{E_{xA}^2 + E_{yA}^2} \quad (4)$$

denklemleriyle bulunur. Görüldüğü gibi yöntemin ilkesi basittir ve analitiktir. Yöntemin sayısal yöntem olması, ortaya çıkan denklem sisteminin genelde sayısal çözümlemeyi gerektirecek boyutlarda olmasından kaynaklanmaktadır.

Burada kısaca ilkesini verdiğimiz bu yöntem, açık sınırlı bir elektromanyetik alan problemi oluşturan hatlar çevresindeki alanın hesabına diğer pek çok analitik ve sayısal yöntemden daha kolaylıkla uygulanabilir.

4. 380 kV'luk Bir Hattın Çevresindeki Elektrik Alanının Yük Benzetim Yöntemi ile Hesabı

Bu bölümde, yük benzetim yöntemi ile kompleks-sonsuz çizgisel yükler kullanarak yapılan, 380 kV'luk üç fazlı bir hat çevresindeki elektrik alan ve potansiyel dağılımı hesabı açıklanmıştır. Şekil 1'de gösterilen hatta ilişkin aşağıdaki veriler kullanılmıştır:

Fazlar arası gerilim: $U = 380 \text{ kV}$

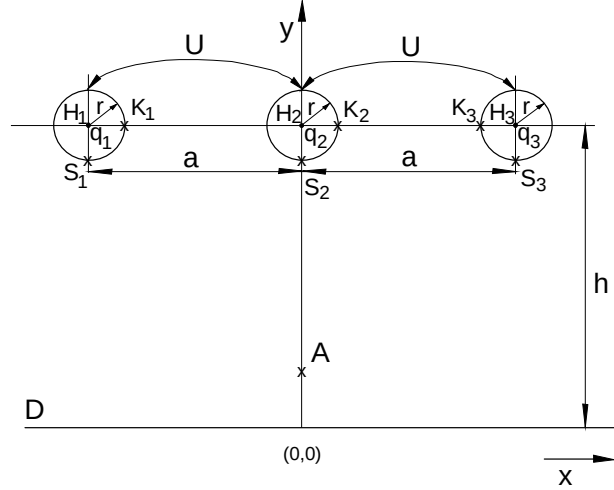
iletken yarıçapı: $r = 15,2 \text{ mm} = 0,0152 \text{ m}$

iletkenlerin yerden yüksekliği: $h = 20,5 \text{ m}$

iletkenler arası açıklık: $a = 7,24 \text{ m}$

Yüklerin koordinatları: $H_1(-7,24; 20,5)$, $H_2(0;21)$, $H_3(7,24; 20,5)$
 Sınır noktalarının koordinatları: $S_1(-7,24; 20,4848)$, $S_2(0; 20,4848)$, $S_3(7,24; 20,4848)$
 Kontrol noktalarının koordinatları: $K_1(-7,2248; 20,5)$, $K_2(0,0152; 20,5)$, $K_3(7,2248; 20,5)$

Problemin çözümü sonsuz çizgisel benzetim yükleri ile yapılmıştır. Bunun için her bir faz iletkeninin ekseninde bir sonsuz çizgisel yükün varlığı göz önüne alınmıştır. Bu yüklerin faz iletkeninin yüzeyinde alınan, potansiyeli iletkenin potansiyeline eşit olan ve sınır noktası adı verilen noktalarda yarattığı potansiyelden yararlanarak bu yüklerin değerleri belirlenmiştir.



Şekil 1. Üç fazlı hatta ilişkin hesap parametreleri.

4.1 Benzetim Yüklerinin Hesabı

Benzetim yüklerinin herhangi bir S_i sınır noktasında oluşturdukları potansiyel

$$V_i = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_1 \ln \frac{\overline{H_1 D}}{\overline{H_1 S_i}} + q_2 \ln \frac{\overline{H_2 D}}{\overline{H_2 S_i}} + q_3 \ln \frac{\overline{H_3 D}}{\overline{H_3 S_i}} \right) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

dir. Eşitlikteki uzaklıklar $\overline{H_1 D} = \overline{H_2 D} = \overline{H_3 D} = h = 20,5$ m olup diğer uzaklıklar koordinatları (örneğin (x_q, y_q) ve (x_i, y_i)) belli olan iki nokta arasındaki uzaklığı veren

$$r = \sqrt{(x_q - x_i)^2 + (y_q - y_i)^2} \quad (6)$$

bağıntısından yararlanarak

$$\begin{aligned} \overline{H_1 S_1} &\cong 0,0152 \text{ m}, \overline{H_2 S_1} \cong 7,24 \text{ m}, \overline{H_3 S_1} \cong 14,48 \text{ m} \\ \overline{H_1 S_2} &\cong 7,24 \text{ m}, \overline{H_2 S_2} = 0,0152 \text{ m}, \overline{H_3 S_2} \cong 7,24 \text{ m} \\ \overline{H_1 S_3} &\cong 14,48 \text{ m}, \overline{H_2 S_3} \cong 7,24 \text{ m}, \overline{H_3 S_3} \cong 0,0152 \text{ m} \end{aligned}$$

dir. (5) bağıntısında $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m, $\epsilon_r = 1$ (hava) olmak üzere $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m dir. Bilinen sınır potansiyelleri olarak her faz için faz durumunu da göz önüne alarak

$$V_1 = \frac{380}{\sqrt{3}} \cong 220 \text{ kV}, \quad V_2 = \frac{380}{\sqrt{3}} e^{j2\pi/3} = -110 + j190,5 \text{ kV}, \quad V_3 = \frac{380}{\sqrt{3}} e^{j4\pi/3} = -110 - j190,5 \text{ kV} \quad (9)$$

yazılır. S1, S2 ve S3 sınır noktaları için (5) denklemleri yazılıp potansiyel değerleri olarak (7), (8) ve (9) deki kompleks potansiyel değerleri alındığında, $[p][q] = [V]$ biçiminde bir denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımının çözümünden

$$\begin{aligned} q_1 &= +1,88312 \cdot 10^{-6} - j 1,69088 \cdot 10^{-7} \text{ C} \\ q_2 &= -1,00681 \cdot 10^{-6} + j 1,74379 \cdot 10^{-6} \text{ C} \\ q_3 &= -7,95124 \cdot 10^{-7} - j 1,71533 \cdot 10^{-6} \text{ C} \end{aligned} \quad (10)$$

kompleks benzetim yükleri bulunur.

4.2 Bir Noktadaki Potansiyelin ve Alanın Hesabı

Benzetim yüklerinin değeri bu şekilde hesaplandıktan sonra herhangi bir noktadaki potansiyelin ve alanın hesabı kolaydır. Örneğin orta fazın altında yerden 1,5 m yükseklikteki A(0; 1,5) noktasındaki potansiyel

$$\begin{aligned} V_A &= \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_1 \ln \frac{\overline{H_1 D}}{H_1 A} + q_2 \ln \frac{\overline{H_2 D}}{H_2 A} + q_3 \ln \frac{\overline{H_3 D}}{H_3 A} \right) \\ \overline{H_1 A} = \overline{H_3 A} &= \sqrt{(x_{H1} - x_A)^2 + (y_{H1} - y_A)^2} = 21,27 \text{ m} \\ \overline{H_2 A} &= y_{H2} - y_A = 20 \text{ m} \\ V_A &= \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_1 \ln \frac{20,5}{21,27} + q_2 \ln \frac{20,5}{20} + q_3 \ln \frac{20,5}{21,27} \right) \\ V_A &= 2,428e^{-j120^\circ} \text{ kV} \end{aligned}$$

A(0;1,5) noktasındaki elektrik alan şiddeti

$$E_A = E_{xA} \hat{i}_x + E_{yA} \hat{i}_y \quad (15)$$

dir. Bu alan şiddetinin bileşenleri

$$\begin{aligned} E_{xA} &= \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(\frac{x_{H1} - x_A}{\overline{H_1 A}^2} q_1 + \frac{x_{H2} - x_A}{\overline{H_2 A}^2} q_2 + \frac{x_{H3} - x_A}{\overline{H_3 A}^2} q_3 \right) \\ E_{xA} &= 0,9728 \text{ kV/cm} \\ E_{yA} &= \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(\frac{y_{H1} - y_A}{\overline{H_1 A}^2} q_1 + \frac{y_{H2} - y_A}{\overline{H_2 A}^2} q_2 + \frac{y_{H3} - y_A}{\overline{H_3 A}^2} q_3 \right) \\ E_{yA} &= 0,1073 \text{ kV/cm} \end{aligned}$$

A noktasındaki elektrik alan şiddetinin mutlak değeri

$$\begin{aligned} E_A &= \sqrt{E_{xA}^2 + E_{yA}^2} \\ E_A &= 0,9787 \text{ kV/cm} \end{aligned}$$

bulunur.

5. Deneyler

Bu bölümde, yüksek gerilim hatları çevresindeki elektromanyetik alanların ölçüm yoluyla belirlenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalar açıklanmıştır. Bu amaçla laboratuvar içinde hat modeli çevresinde ve açık havada gerçek hat çevresinde iki grup ölçme yapılmıştır. Aşağıda yapılan deneyler ve sonuçları verilmiştir.

5.1 Laboratuvar Deneyleri

Laboratuvar deneyleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Fuat Külünk Yüksek Gerilim Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Deneyleri gerçekleştirebilmek için laboratuvar içinde 66 kV'luk bir hava hattı modeli kurulmuştur. Bunun için bir demir direk modeline 6 adet zincir izolatöründen oluşan izolatör zinciri ve bunun ucuna da yere paralel olarak yerleştirilmiş hava hattını temsilen 4 m uzunluğunda, 8 mm çapında dolu bakır iletken bağlanmıştır. Hattın yerden yüksekliği 2,20 m'dir. Bu hatta, laboratuvarında bulunan 300 kV'luk 50 kVA gücünde bir fazlı bir deney transformatöründen yüksek gerilim uygulanmıştır. Uygulanan deney gerilimi, bir kumanda masasından ayarlanmış ve deney transformatörünün birincil tarafına bağlı bir voltmetre ile ölçülmüştür.

Elektromanyetik alan ölçmeleri, 0,135-30 MHz aralığında parazit gerilimlerini ve elektrik ve manyetik parazit alanlarını ölçebilen bir radyoparazit ölçü aleti ile yapılmıştır. Bu ölçü aleti, dar bandlı kısmi boşalma ölçü aleti veya RIV-metre gibi adlarla da tanınmaktadır. Kullanılan ölçü aletinin band genişliği 9 kHz±%10, giriş empedansı $Z_i=60 \Omega$ ve temel gerilim düzeyi $U_t=0,4 \mu V$ 'tur. Alet hem şebekeden beslemeli hem de pille çalışabilmektedir. Ayrıca alet, yayımlanan ve iletilen parazitlere karşı çift ekran korumalı ve besleme filtrelidir.

Ölçü aleti büyüklükleri desibel (dB) cinsinden ölçmektedir. Aletten desibel (dB) olarak okunan değerler, istenirse aşağıdaki bağlantılar yardımıyla ölçülmek istenen alan büyüklük birimine çevrilebilir:

Manyetik alan

$$H[dB] = 20 \log(H_m/H_t) \quad (16)$$

Elektrik alanı

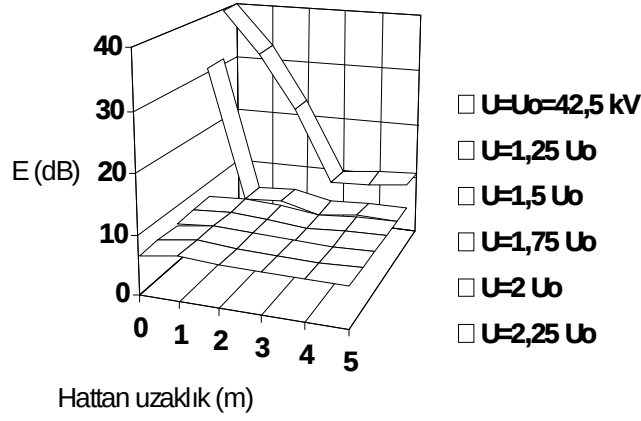
$$E[dB] = 20 \log(E_m/E_t) \quad (17)$$

Gerilim

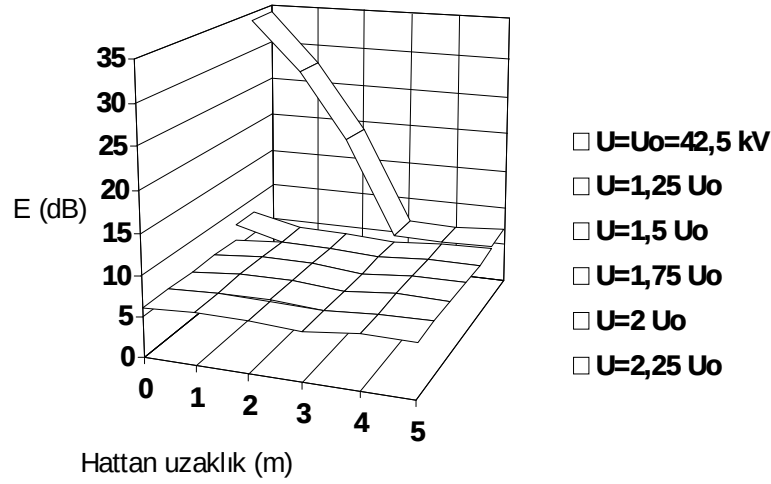
$$U[dB] = 20 \log(U_m/U_t) \quad (18)$$

Elektrik alanı ölçmelerinde boyu 2,5 metre uzayabilen 0,4 m uzunluğunda bir çubuk anten; manyetik alan ölçmeleri ise çapı $r=0,6$ m olan bir halka anten kullanılmıştır. Ölçmeler önce model hattın tam altında, daha sonra hattan değişik uzaklıklarda, 0,5 MHz ile 1 MHz ölçme frekanslarında gerçekleştirilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 2'de 0,5 MHz ölçme frekansında, Şekil 3'te de 1 MHz ölçme frekansında hatta uygulanan gerilim parametre alınarak, yerden 1 m yükseklikte desibel olarak ölçülen elektrik alanının hattan olan uzaklıkla değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 2. Yerden 1 m yükseklikte ve 0,5 MHz ölçme frekansı için farklı hat gerilimlerinde hattın uzaklıkla elektrik alan şiddetinin değişimi.

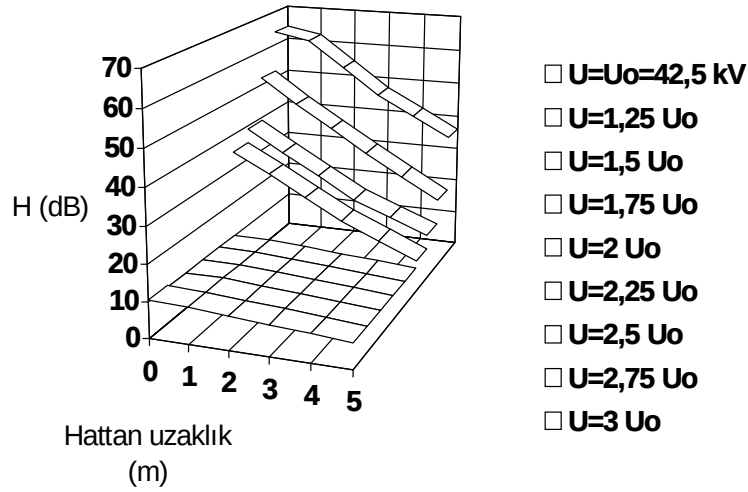


Şekil 3. Yerden 1 m yükseklikte ve 1 MHz ölçme frekansı için farklı hat gerilimlerinde hattın uzaklıkla elektrik alan şiddetinin değişimi.

Şekil 4'te 1 MHz ölçme frekansında hatta uygulanan gerilim parametre alınarak, yerden 1 m yükseklikte desibel olarak ölçülen manyetik alanının hattın uzaklıkla değişimleri gösterilmiştir.

5.2 Gerçek Hatlar Çevresinde Yapılan Ölçmeler

Bu bölümde de açık havada gerçek hat çevresinde yapılmış olan deneyler ve sonuçları açıklanacaktır.

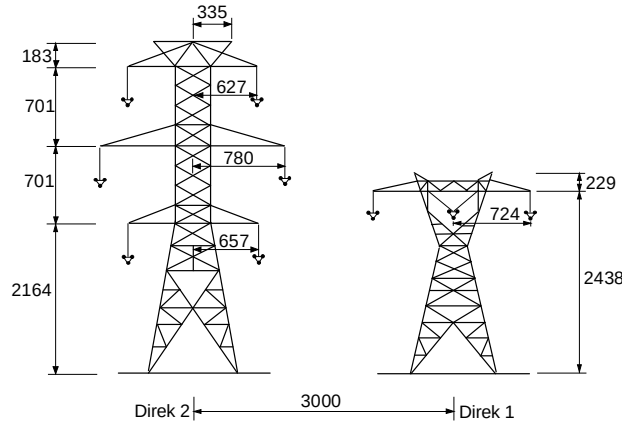


Şekil 4. Yerden 1 m yükseklikte ve 1 MHz ölçme frekansı için farklı hat gerilimlerinde hattın uzaklıkla manyetik alan şiddetinin değişimi.

Açık havada gerçek hatlar çevresinde yapılan ölçmeler, İstanbul-TEM otoyolu üzerinde, Kağıthane-Arıcılar mahallesi üzerinden geçen 380 kV'luk indirici merkez girişindeki hatlar altında yapılmıştır. Ölçmelerde laboratuvar ölçmelerinde kullanılan ölçme donanımı kullanılmıştır.

Ölçmelere, 28.10.1994 Cuma günü saat 15:30'da başlanmış ve saat 17:25'de bitirilmiştir. Ölçme yerindeki hava basıncı 764 mmHg ve hava sıcaklığı $t = 20^\circ\text{C}$ olarak kaydedilmiştir. Ölçmelerin yapıldığı hatlara ilişkin taşıyıcı direkler Şekil 5'te görülmektedir. Faz hatları üçlü demet iletkenli olup hatların üzerinde koruma iletkenleri de vardır.

Ölçmelere Şekil 5'te görülen 1 numaralı direktteki hattın orta fazının altından başlanmış ve bu başlangıç noktasından itibaren sağa doğru, her 5 metrede bir olmak üzere, 10 noktada daha ölçme yapılmıştır.



Şekil 5. Ölçmelerin yapıldığı hatların ve direklerin durumu.

Bu 10 noktadaki ölçmeden sonra, ekseni 1 numaralı direğin ekseninden yaklaşık 30 m sol tarafında kalan 2 numaralı direğin orta noktasına gelinmiş ve bu noktadan itibaren sola doğru yine 5 m aralıklarla 12 noktada ölçme yapılmış ve değerler kaydedilmiştir. Son olarak, iki direk arasında 5'er m aralıklarla 5 noktada ölçme yapılmıştır. Ölçmelerin bu şekilde direklerin eksenleri etrafında eşit sayıda yapılamayışının sebebi, arazinin düzgün bir yapı göstermeyip çevrenin engebeli olmasıdır.

Ölçmeler sonucunda elde edilen değerler Tablo 1, 2 ve 3'te verilmiştir.

Tablo 1. 1 numaralı direğin orta fazının altından 5'er metre aralıklarla sağa doğru, iki farklı frekansta ölçülen elektrik ve manyetik alan şiddeti değerlerinin değişimi.

Ölçme Noktası	f=1 MHz		f=0,5 MHz	
	E (dB)	H (dB)	E (dB)	H (dB)
1	17,0	36,0	17,0	36,0
2	15,0	36,0	15,0	36,5
3	13,0	35,0	12,5	35,0
4	13,0	33,0	11,5	33,0
5	12,0	32,0	11,5	32,0
6	11,0	31,5	11,0	30,0
7	9,5	32,0	10,0	27,8
8	9,7	29,5	10,0	25,5
9	16,0	30,0	11,5	28,8
10	15,0	29,0	10,5	29,5

Tablo 2. 2 numaralı direğin ekseninden itibaren sola doğru 5'er metre aralıklarla iki farklı frekansta ölçülen elektrik ve manyetik alan şiddeti değerlerinin değişimi.

Ölçme Noktası	f=1 MHz		f=0,5 MHz	
	E (dB)	H (dB)	E (dB)	H (dB)
20	22,2	37,0	27,8	48,6
21	26,5	37,8	24,0	48,0
22	25,0	42,5	21,0	47,5
23	25,0	43,0	20,0	46,8
24	24,3	41,8	19,6	45,0
25	22,2	44,5	17,0	44,1
26	18,8	42,2	14,5	42,0
27	12,5	38,8	9,7	37,8
28	11,9	34,0	7,6	34,6
29	9,9	31,0	6,8	31,4
30	9,3	31,5	6,0	29,1
31	14,0	31,5	6,9	28,5

Tablo 3. 2 numaralı direğin ekseninden itibaren sağa doğru 5'er metre aralıklarla iki farklı frekansta ölçülen elektrik ve manyetik alan şiddeti değerlerinin değişimi.

Ölçme Noktası	f=1 MHz		f=0,5 MHz	
	E (dB)	H (dB)	E (dB)	H (dB)
40	22,0	45,6	31,0	52,5
41	20,3	48,0	30,5	49,2
42	21,0	48,5	30,0	45,9
43	21,5	48,5	29,5	43,6
44	21,0	48,2	27,5	43,5
45	21,5	48,8	27,0	44,8
46	22,2	48,8	26,5	45,0
47	22,1	48,5	24,8	43,9

6. Sonuçlar

Yük benzetim yöntemiyle kuramsal olarak yapılan hesaplardan ve laboratuarda ve açık havada yapılan deneylerden elektromanyetik alanın hattan uzaklaştıkça hızla azaldığı görülmüştür. Hesaplanan ve ölçülen alan değerleri 380 kV'luk bir yüksek gerilim hattı çevresindeki alan değerlerinin mertebesi hakkında bilgi vermektedir. Bu bilgilerin, elektriksel atlamaya karşı güvenlik açıklıkları tanımlı hatlar için ayrıca elektromanyetik etkileşim açıklıklarının tanımlanmasında yararlanılabileceğini düşünüyoruz.

7. Kaynaklar

- [1] Jones B., *New Approaches to the Design and Economics of EHV Transmission Plant*, Pergamon Press, Oxford, 1972.
- [2] Brown J. D., Fisher F. A., Neugebauer W., Panek J., *Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above*, EPRI, Palo Alto, 1982.
- [3] M. V. Deshpande, *Electrical Power System Design*, Tata McGraw-Hill, New Delhi, 1992.
- [4] Weedy B. M., Cory B. J., *Electric Power Systems*, John Wiley and Sons, Chichester, 1998.
- [5] Gönen T., *Electric Power Transmission Systems Engineering Analysis and Design*, John Wiley and Sons, New York, 1988.
- [6] Ryan H. M., *High Voltage Engineering & Testing*, Institution of Electrical Engineers, 1994.
- [7] Özkaya, M., *Yüksek Gerilim Tekniğinde Deşarj Olayları*, İ.T.Ü. Kütüphanesi Sayı: 1152, İstanbul, 1979.
- [8] Gönenç, İ., *Yüksek Gerilim Tekniği*, Cilt I, Statik Elektrik Alanı ve Basit Elektrot Sistemleri, İ.T.Ü. Kütüphanesi Sayı: 1085, İstanbul, 1977.
- [9] Sirotinski, L. I. (Çeviren: Özkaya, M.), *Yüksek Gerilim Tekniği, Gazlarda Deşarj Olayları*, İ.T.Ü. Kütüphanesi Sayı: 594, İstanbul, 1964.
- [10] Barrack C. S., Stewart M. G., Shen B. L., Siew W. H., Campbell L. C., Chalmers I. D., Walker K. F., Pryor B. M., Muir F. C., "Fast Transient Radiated and Conducted Electromagnetic Interference Measurement within Power System Substations", Eleventh Int. Symp. on High-Voltage Engineering, London, Vol. 2, s.160-163, 23-27 Aug.1999.
- [11] Kumari M. K., Kumar O. R., Nambudiri P. V. V., Srinivasan K., "Computation of Electrical Environmental Effects of Transmission Lines", Eleventh Int. Symp. on High-Voltage Engineering, London, Vol. 2, s.160-163, 23-27 Aug.1999.
- [12] Malik N. H., Al-Arainy A., Qreshi M. I., *Electrical Insulation in Power Systems*, Marcel Dekker, New York, 1998.
- [13] Christopoulos C., *Principles and Techniques of Electromagnetic Compatibility*, CRC Press Inc., Florida/USA, 1995.
- [14] Scott J. S.; *Introduction to EMC*, Newness, Oxford, 1997.
- [15] Ryan M., *High Voltage Engineering and Testing*, Peter Peregrinus Ltd., London, 1994.
- [16] Khalifa M., *High Voltage Engineering: Theory and Practice*, Marcel Decker ; New York, 1990.
- [17] Kreuger F. H., *Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment*, Butterworth&Co. Ltd., London, 1989.
- [18] Mesny R. (çeviren A. Ataman), *Genel Radyoelektrik*, İTÜ Yayını, İstanbul, 1957.
- [19] İdemen M., *Elektromanyetik Dalgaların Temelleri*, İTÜ yayını, İstanbul, 1975.
- [20] Houdek J. A., *Economical Solutions to Meet harmonic Distortion Limits*, MTE Corporation Press, 2000.
- [21] Moulder J. E., *Electromagnetic Fields and Human Health*, Medical Collage of Wisconsin, 2000.
- [22] Chadwick P., Sienkiewicz Z., *Electromagnetic Fields*, World Health Organization Press, 1999.
- [23] *Guidelines For Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)*, ICNIRP Guidelines.
- [24] Akkaya İ., *Antenler ve Propagasyon*, Sistem Yayıncılık, İstanbul, 1997
- [25] Pazarıcı M., *Radyo Televizyon Sistemleri*, Ders Notu, 2000.
- [26] <http://www.mcw.edu>
- [27] <http://www.who.int/peh-emf>
- [28] <http://www.icnirp.de>
- [29] <http://www.nrp.org.uk>
- [30] <http://www.ttarge.gov.tr> (Türk Telekom Arge web sayfası)
- [31] <http://www.law.urnich.edu> (Michigan Telecommunication archive)
- [32] <http://icae.atmos.uah.edu> (11th International Conference on Atmospheric Electricity)

- [1] Umurkan N., Yıldırım H., Kalenderli Ö., "Yüksek gerilim hatları çevresinde elektrik alan hesabı", Elektrik Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi, s. 1249- 1253, Trabzon, Eylül 1993.
- [2] Umurkan N., Yıldırım H., Kalenderli Ö., "Ulusal orta ve yüksek gerilimli enerji iletim hatları çevresinde elektrik alan hesabı için yeni bir yaklaşım", Elmeksem'93 III. Elektromekanik Sempozyumu, s. 154-160, Bursa, Aralık 1993.
- [3] Davis J. G., Bennett W. R. ve diğerleri, "Health effects of low-frequency electric and magnetic fields", Environmental Science and Technology, Vol. 27, No.1, s. 42-51, 1993.
- [4] Malik N. H., "A Review of the Charge Simulation Method and its Applications", IEEE Transactions on Electrical Insulation, EI-Vol.24, s. 3-20, Şubat 1989.
- [5] Bracken T. D., "Field Measurements and Calculations of Electrostatic Effects of Overhead Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-Vol.95, Sayfa 494-504, Nisan 1976.