

**YÜKSEK GERİLİM HATLARINDA TOPRAKLAMA ÇÖZÜMLERİ İLE YILDIRIM
ELEKTROMANYETİK DARBELERİNİN İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF LIGHTNING ELECTROMAGNETIC PULSES WITH GROUNDING
SOLUTIONS IN HIGH VOLTAGE LINES**

Turan ÇAKIL^{*1} 

¹ Hazine ve Maliye Bakanlığı, Ankara, Türkiye.

ABSTRACT

This study evaluated the grounding improvement works in power transmission lines in a technical and scientific framework. The aim of the study is to detail the grounding improvement processes to increase the reliability and efficiency of power transmission lines. Lightning and Electromagnetic Pulse (LEMP) intensities and current amplitudes obtained from the General Directorate of Meteorology (MGM) were taken into account in the analyses. The electrical performance of the line and its resilience against LEMP induced faults are evaluated using simulations with Electromagnetic Transients Program (ATP-EMTP) software. As an example, the Isparta (Keciborlu)-Burdur power transmission line is analysed and the reductions in the number of LEMP-induced tripping are investigated as a result of grounding improvement works. Guy Wires (GW) increased the coupling between the phase conductors, enabling more effective transfer of the LEMP current to earth and reducing the equivalent earth resistance. In the study, it is recommended that the use of low-cost and easy-to-install methods such as GW should be widespread due to the high cost of line surge arresters. In addition, GW applications on 154 kV power transmission lines were analysed in detail and it was found that this technique provides a reduction of up to 66% in the jump voltage at the insulator end. The study emphasizes the importance of grounding improvement methods for the creation of a reliable, sustainable and economical infrastructure in power transmission lines. These findings are expected to contribute to the literature for the development of more effective and cost-effective solutions in power systems.

Keywords: Electromagnetic Fields, Energy Transmission Lines, HV, LEMP, Power Systems.

ÖZET

Bu çalışma, enerji iletim hatlarındaki topraklama iyileştirme çalışmalarını teknik ve bilimsel bir çerçevede değerlendirmiştir. Çalışmanın amacı, enerji iletim hatlarının güvenilirliğini ve verimliliğini artırmaya yönelik topraklama iyileştirme süreçlerini detaylandırmaktır. Analizlerde, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden (MGM) alınan Yıldırım ve Elektromanyetik Darbe (YEMD) yoğunlukları ve akım genlikleri dikkate alınmıştır. Hattın elektriksel performansı ve YEMD kaynaklı arızalara karşı dayanıklılığı, Elektromanyetik Transient Program (ATP-EMTP) yazılımı ile yapılan simülasyonlar kullanılarak değerlendirilmiştir. Örnek olarak, Isparta (Keçiborlu)-Burdur enerji iletim hattı analiz edilmiş ve topraklama iyileştirme çalışmaları sonucunda YEMD kaynaklı açma sayılarında meydana gelen azalmalar incelenmiştir. Guy Wires (GW), faz iletkenleri arasındaki kuplajı artırarak YEMD akımının toprağa daha etkili bir şekilde aktarılmasını sağlamış ve eşdeğer toprak direncini düşürmüştür. Çalışmada, hat parafudurlarının yüksek maliyeti nedeniyle GW gibi düşük maliyetli ve kolay kurulabilen yöntemlerin kullanımının yaygınlaştırılması önerilmektedir. Ayrıca 154 kV enerji iletim hatlarında GW uygulamaları, detaylı şekilde incelenmiş ve bu tekniğin izolatör ucundaki atlama geriliminde %66'ya varan bir düşüş sağladığı tespit edilmiştir. Çalışma, enerji iletim hatlarında güvenli, sürdürülebilir ve ekonomik bir altyapının oluşturulması için topraklama iyileştirme yöntemlerinin önemini vurgulamaktadır. Bu bulgular, güç sistemlerinde daha etkili ve maliyet avantajlı çözümler geliştirilmesi için literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik Alanlar, Enerji İletim Hatları, Güç Sistemleri, YEMD, YG.

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: turan_cakil23@hotmail.com

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayın Tarihi
19.01.2025	17.02.2025	04.03.2025	01.06.2025

1. GİRİŞ

Çalışmada, enerji iletim hatlarındaki topraklama iyileştirme çalışmalarına yönelik özel teknik şartname detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, enerji iletim hatlarında topraklama sistemlerinin iyileştirilmesiyle sağlanabilecek güvenlik ve verimlilik artışını teknik ve bilimsel bir çerçevede değerlendirmektir. Bu kapsamda, topraklama iyileştirmesine konu olacak iletim hatlarının açma sayıları, MGM verilerinden elde edilen YEMD yoğunlukları ve akım genlikleri dikkate alınarak analiz edilmiştir. Ardından, belirlenen hatların elektriksel davranışları ve YEMD kaynaklı arızalara karşı performansları simülasyon tabanlı bir yaklaşımla incelenmiştir. Simülasyon çalışmaları, ATP-EMTP yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve YEMD'in hatta direk düşmesi sonucu Isparta (Keçiborlu)-Burdur enerji iletim hattı örneği üzerinden somutlaştırılmıştır. Bu süreçte, bilgisayar ortamında yapılan analizlerle, hatlarda meydana gelebilecek olası akım değerlerinin tahmin edilmesi, uygulanacak topraklama iyileştirme çalışmaları sonrasında YEMD kaynaklı açma sayılarındaki değişimin ölçülmesi hedeflenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, topraklama iyileştirme çalışmalarının enerji arz güvenliği ve can güvenliği üzerindeki olumlu etkileri detaylı olarak değerlendirilmiştir. Günümüze kadar literatürde sayısız çalışma olsa da güncel üç çalışmadan biri, R. Batista ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada derin dikey elektrotlardan oluşan topraklama sistemine sahip 230 kV'luk bir iletim hattına yıldırım düşmesi sonucu meydana gelen etkileri analiz etmişlerdir. Bir diğer güncel çalışma ise Leonid Grcev ve Blagoja Markovski, yıldırım darbesinin topraklama ızgaralarının empedansı üzerindeki etkilerini inceleyerek, ızgara tipi topraklama modellerinin etki alanı ve empedansına bağlı olarak oluşan indüklenmiş gerilimleri belirlemeye çalışmışlardır. Diğer bir çalışmada K. Ishimoto ve arkadaşları, dağıtım hatlarının doğrudan koruma iletkenine yıldırım elektromanyetik darbesi düşmesi sonucu üç boyutlu sonlu fark zaman alanı yöntemi ile etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmalar, enerji iletim hatlarının yıldırım etkilerine karşı korunması ve topraklama sistemlerinin etkinliğinin artırılması açısından önemli bulgular sunmaktadır [1-9]. Bu çalışmada ise topraklama iyileştirme süreçlerinin teknik gerekliliklerini ortaya koymanın yanı sıra, bu süreçlerin fayda-maliyet analizine dayalı olarak nasıl optimize edilmesi gerektiğine dair öneriler sunmaktadır. Böylelikle, enerji iletim hatlarında daha güvenilir, sürdürülebilir ve ekonomik bir altyapının oluşturulmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Değişken İletim Hattı Modeli

YEMD akım modelleri, genel olarak dört ana sınıfa ayrılmaktadır: gaz dinamiği veya fiziksel modeller, elektromanyetik modeller, RLC iletim hattı modelleri ve mühendislik modelleridir [3-5,7-10]. Literatürde, YEMD kaynaklı yansıyan akımların hesaplanmasında en yaygın olarak tercih edilen yaklaşım, mühendislik modelleri olmuştur. Bu çalışmada ise, kullanılan mühendislik modeli olan Değişken İletim Hattı Modeli (DİH) modeli kullanılmıştır. Kullanılmasının nedeni ise daha gerçekçi bir yaklaşımla YEMD'in enerji iletim hattına etkisini tespit etmeye çalışmaktır. Bu model, Denklem (1, 2 ve 3)'de açıklanmıştır. Açıklanan denklemler, simülasyon modeline eklenmiştir [6,8,9,11-12].

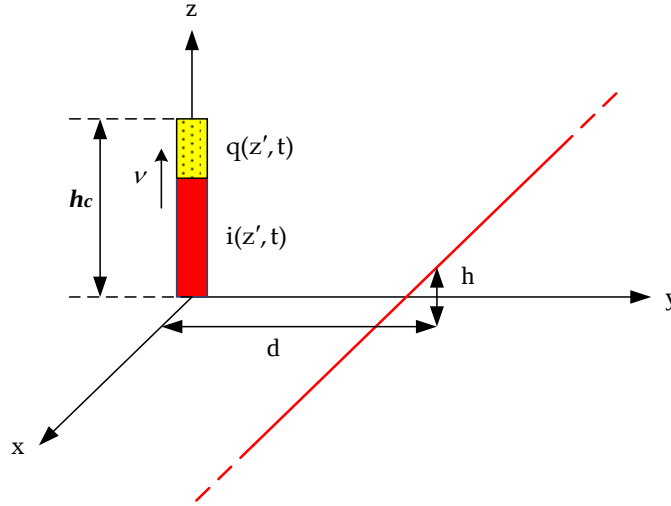
$$i(z', t) = \begin{cases} i\left(0, t - \frac{z'}{v}\right) \cdot (1 - z'/H), & z' \leq vt \\ 0, & z' > vt \end{cases} \quad (1)$$

$$\rho(z', t) = \frac{1 - z'/H}{H} + \frac{i(0, t - z'/v_f)}{v_f} + \frac{1}{H} \cdot Q(t) \quad (2)$$

Burada $Q(t)$ t zamanda topraktan kanala toplam yükün şarj transferidir:

$$Q(t) = \int_{z'/V}^t i(0, \tau - z'/v) d\tau \quad (3)$$

Şekil 1'de gösterilen geometrik yapı ve mükemmel iletken bir düzlem üzerinde dikey bir anten olarak kabul edilen yıldırım kanalı boyunca z yüksekliğinde ve d uzunluğunda bir dipolden yayılan elektromanyetik alan ifadelerini içerir.



Şekil 1. YEMD'in enerji iletim hatlarına dolaylı ve doğrudan etkisini gösteren YEMD kanalı

2.2. YEMD Kanalının Akım Tespiti için Kullanılan Heidler Modeli

Çalışmada kullanılan YEMD akım modeli Heidler modelidir. Heidler akım modeli, yıldırım elektromanyetik darbe (YEMD) akımlarının mühendislik perspektifinden analitik olarak temsil edilmesinde sıkça başvurulan bir yaklaşımdır. Model, YEMD akımının zamana bağlı dalga formunu, fiziksel süreçlerin mühendislik bağlamında yalınlaştırılmış bir temsili olarak, matematiksel ifadelerle açıklar. YEMD akımının zamansal profiline ilişkin temel parametreler olan tepe akımı, yükselme zamanı ve sönümlenme süresi, modelin doğruluğunu ve uygulama başarısını belirleyen ana unsurlar arasında yer alır. Denklem 4' de ve Denklem 5' te model gösterilmiştir [6,13-15].

$$i(0, t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{(t/\tau_1)}{1 + (t/\tau_2)} \cdot \exp(-t/\tau_2) \cdot u(t) \quad (4)$$

$$\eta = \exp[-(\tau_1/\tau_2) \cdot (n\tau_2/\tau_1)^{1/n}] \quad (5)$$

Burada:

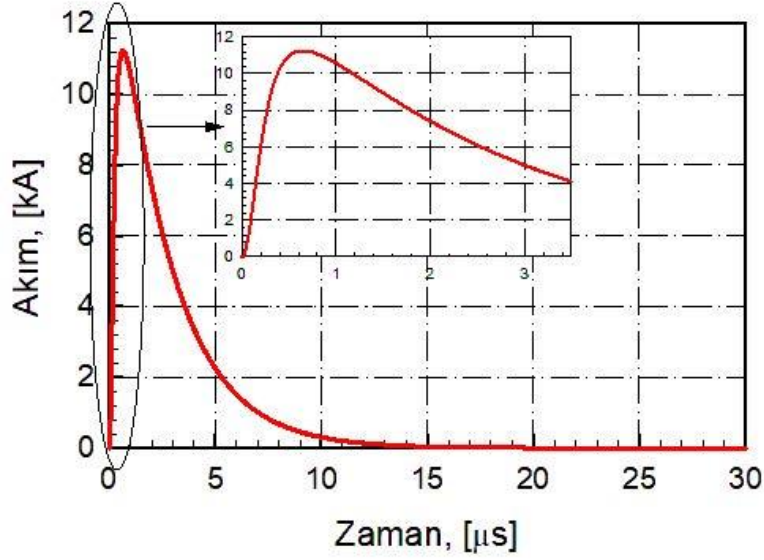
τ_1 : yükselen akımın zaman sabiti

τ_2 : yükselen akımın dalga formunun bozunma sabiti

n: belirtilen diklik faktörü (2-10 arasında)

I_0 : kanal taban akımının genlik değeri

Heidler akım modeli, YEMD' in fiziksel gerçekliğine uygun bir şekilde, akımın hızlı yükselme evresi ile daha yavaş sönümlenme evresini ayrı ayrı modelleyerek, YEMD olaylarının sistemlere etkilerini simüle etme açısından güçlü bir araç sunar. Modelin en önemli avantajlarından biri, fiziksel ve elektromanyetik süreçlerin karmaşıklığını basitleştirilmiş analitik ifadelerle ifade etmesine rağmen, gerçeğe oldukça yakın sonuçlar üretmesidir. Bu özellik, enerji iletim hatları, topraklama sistemleri ve diğer güç iletim altyapılarında YEMD kaynaklı akımların etkilerinin analizinde modelin sıklıkla tercih edilmesini sağlamaktadır. Heidler akım modeli, özellikle enerji iletim sistemlerinde aşırı gerilimlerin yayılımının hesaplanması, izolatör performanslarının değerlendirilmesi ve YEMD koruma sistemlerinin tasarımında geniş bir uygulama alanına sahiptir [16-26]. Heidler modeli, YEMD akımlarının zamansal özelliklerini modellemede sağladığı denge ile hem mühendislik uygulamalarında pratik bir araç hem de akademik araştırmalarda yaygın bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Modelin parametrik sadeliği, geniş bir senaryo yelpazesinde uygulanabilirliğini mümkün kılarken, yıldırım kaynaklı elektromanyetik etkilerin değerlendirilmesinde etkinliğini kanıtlamaktadır. Heidler akım modeli Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. YEMD kanalının Heidler akım modeli ile gösterimi

2.3. YEMD Verilerinin İstatistikleri

Bu çalışmada MGM ile TEİAŞ'ın 2018 – 2023 yılları arasındaki YEMD verilerinden (şimşek verileri dahil edilmemiştir) yararlanılmıştır. Çalışmada Türkiye’de en fazla YEMD düşmelerine maruz kalan iki bölgesinden biri olan Burdur-Antalya-Konya bölgesi verileri materyal olarak incelenmiştir [25]. Bu başlık altında YEMD verileri kullanılarak düşen YEMD’lerin akım genlikleri incelenmiştir. Etki süreleri tespit edilmediğinden eşit alınmıştır.

Tablo 1’de bölgeye düşen YEMD akımlarının hangi değerlerde daha çok düştüğü ve bu değerlerin üzerinde düşen YEMD akımlarını sayısal olarak gösterilmektedir [22]. Tümünün ortalaması alındığında 18,3 kA olarak tespit edilmiştir. Tablo 2’de ise bölgeye yıl boyunca düşen YEMD’ in yüzdesel dilimine karşılık gelen sayıyı gösterilmektedir [22]. Tablo 3’te bölgeye yıllara bağlı düşen YEMD akımının maksimum ve minimum değerlerini gösterilmektedir [22].

Tablo 1. Yüzdesel ifadesi karşılığındaki YEMD akım değerleri [22]

(bu akım değeri ve daha üstü değerlerin olma olasılığını ifade eder.) (Burdur-Antalya-Konya Bölgesi)

Yıl	%1	%5	%10	%20	%30	%40	%50	%60	%70	%80	%99
2018(kA)	82	42	29	20	15	12	10	8	7	5	2
2019(kA)	87	41	28	18	14	10	8	6	5	4	2
2020(kA)	74	39	27	17	12	9	8	7	6	5	3
2021(kA)	69	31	21	14	9	7	6	5	5	4	2
2022(kA)	77	38	26	17	11	8	7	6	5	4	2
2023(kA)	62	32	22	14	10	8	7	6	5	4	2
Ort. (kA) Değeri	75.2	37.2	25.5	16.6	11.8	9	7.6	6.3	5.5	4.3	2.2

Tablo 2. Yıl boyunca düşen YEMD sayısı [22]
(Burdur-Antalya-Konya Bölgesi)

Yıl	%1	%5	%30	%40	%50	%70	%99
2018	418 ₍₈₂₎	2092 ₍₄₂₎	13837 ₍₁₅₎	18151 ₍₁₂₎	21903 ₍₁₀₎	30093 ₍₇₎	40705 ₍₂₎
2019	466 ₍₈₇₎	2433 ₍₄₁₎	14359 ₍₁₄₎	20085 ₍₁₀₎	25070 ₍₈₎	38625 ₍₅₎	45552 ₍₂₎
2020	254 ₍₇₄₎	1233 ₍₃₉₎	7940 ₍₁₂₎	11716 ₍₉₎	13858 ₍₈₎	19567 ₍₆₎	24059 ₍₃₎
2021	504 ₍₆₉₎	2583 ₍₃₁₎	17170 ₍₉₎	24425 ₍₇₎	30337 ₍₆₎	38020 ₍₅₎	48459 ₍₂₎
2022	596 ₍₇₇₎	3058 ₍₃₈₎	19370 ₍₁₁₎	28267 ₍₈₎	33996 ₍₇₎	49848 ₍₅₎	57786 ₍₂₎
2023	771 ₍₆₂₎	3818 ₍₃₂₎	24459 ₍₁₀₎	33243 ₍₈₎	40543 ₍₇₎	61684 ₍₅₎	73383 ₍₂₎
Ort. Değer	501.5	7510.6	2536.1	22647.8	27617.8	39639.5	48324

Tablo 3. Yıllara bağlı düşen YEMD akımının maksimum ve minimum değerleri [22]
(Burdur-Antalya-Konya Bölgesi)

Yıl	Minimum (kA)	Maksimum (kA)
2018	1	290
2019	2	280
2020	2	266
2021	2	267
2022	2	279
2023	2	336
Ort. Değer	1.83	286.3

2.4. Enerji İletim Hattında YEMD Kaynaklı Darbe Akımlarına Karşı Topraklama Yönünden İyileştirme Metotları için Sahada Tespit Edilen Bulgular

Ülkemizde 154 ve 400 kV direklerde YEMD kaynaklı açmaların sıklığı bazı bölgelerde önemli bir sorundur. Bu sorunu çözmek için üç temel yaklaşım önerilmektedir:

- Topraklama iyileştirmesi
- İzolatör boyunu artırma
- Parafudur kullanımı

Son dönemde güncellenen topraklama şartnamesinde topraklama direncinin 10 ohm seviyesine düşürülmesini hedeflemektedir. Bu bağlamda, mevcut 20 ohm'luk topraklama direncinin 10 ohm'a indirilebilmesi için dört ek kazık çakılmasının gerektiği ifade edilmektedir. Ancak yapılan kapsamlı analizler, ilave kazık çakılmasının topraklama direncinde anlamlı bir düşüş sağlamadığını ortaya koymaktadır. Yüksek gerilim direklerinin mevcut yapısal tasarımında, direğin dört çelik ayağı çelik donatılar ve betonla desteklenmiş bir yapı oluşturmakta ve bu tasarımın zaten yeterli bir topraklama performansı sunduğu belirlenmiştir [18]. Dolayısıyla, ekstra kazık uygulaması, sistemin toplam empedansında kayda değer bir azalmaya neden olmamaktadır. Bu çalışmada, bu nedenle özel topraklama sistemleri kullanılması önerilmiş ve simülasyonlarla bu durum açıklanmaya çalışılmıştır.

2.4.1. Enerji İletim Hattında YEMD Kaynaklı Darbe Akımlarına Karşı Topraklama Yönünden İyileştirme Metotları

YEMD akımlarının yüksek topraklama değerine sahip direklere isabet etmesi, direk üzerinde daha yüksek gerilimlerin oluşmasına ve izolatör dayanım (atlama) geriliminin aşılması durumunda Geri Atlama (Back Flashover) oluşmasına yol açar. Bu sorunun önlenmesi için izolatör atlama gerilimini artıracak faz-toprak mesafesi artırılabilir veya topraklama değerleri düşürülerek direkte oluşan gerilim azaltılabilir. İki yöntemin birlikte uygulanması, açma sayılarında önemli ölçüde azalma sağlar [19]. Topraklama iyileştirmelerinde dikey kazık kullanımından ziyade, yatay iletkenlerin ve düşük özgül dirence sahip humuslu toprağın daha etkili olduğu belirtilmiştir. Kayalık arazilerde kazık yerine yalnızca yatay iletkenler ve humus kullanımı önerilirken, uygun koşullarda kazık, yatay iletken ve humus uygulamaları birlikte yapılmalıdır [20-22]. Topraklama sisteminin temel bileşeni direğin kendisi olduğundan, iyileştirme çalışmaları bu yapıyı göz önünde bulundurarak planlanmalıdır.

2.4.2. Dört Kazık Mesh Tipi Metodu

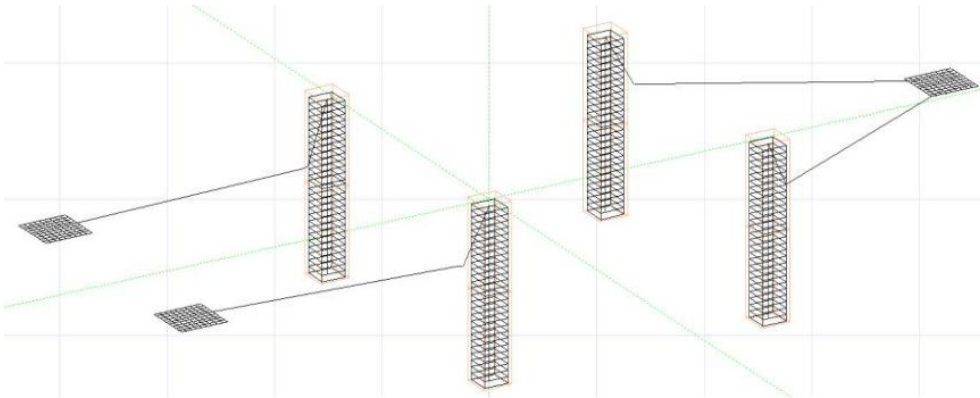
Bu uygulamada; direğin etrafına çelik iletken yerin 1 metre altından serilip 4 kazık ve direk ile birleştirilmiştir. Bu uygulamanın zor olacağı düşünülen yerlerde Dört kazık + hasır + humus metodu seçilmelidir.

2.4.3. Dört Kazık + Hasır + Humus Tipi Metodu

Bu uygulamada, her bir direk ayağı çevresine 3 metre çapında çukur kazılması önerilmektedir. Arazinin özelliklerine bağlı olarak, hasır boyutları 1 ila 2 metre arasında değişiklik gösterebilir. Bu hasır, kazıklar ve direk ayağı ile etkin bir şekilde irtibatlandırılmalıdır. Uygulama sırasında, hasırın altına ve yanlarına 25 cm kalınlığında humuslu toprak serilmeli, ardından hasır yerleştirildikten sonra üzerine yeniden humus eklenerek ana toprak ile kaplama işlemi tamamlanmalıdır. Her bir hasır için dört göz oluşturulması yeterli olacaktır. Hasır uygulamasının yalnızca iki köşeye yapılmasının nedeni, işletme sırasında direğin örülmüş olduğu durumlarda çalışma koşullarının zorluğudur. Ancak tesisin ilk kurulum aşamasında, tüm köşelere hasır yerleştirilmesi mümkündür ve bu tercih, sistemin topraklama verimliliğini artırabilir.

2.4.4. Counterpoise + Hasır + Humus Metodu

Counterpoise ve hasır uygulamalarının doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi ve uygulanacağı yönlerin belirlenmesi, topraklama sisteminin etkinliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda yapılan modelleme çalışmaları, direğin uygun iki tarafına ayaklardan yatay iletken bağlanması ve direkten yaklaşık 5-10 metre mesafedeki hasır ile irtibat kurulması durumunda, topraklama değerlerinin iyileştirilebileceğini ortaya koymuştur. Şekil 3'te bu topraklama metodu gösterilmiştir.

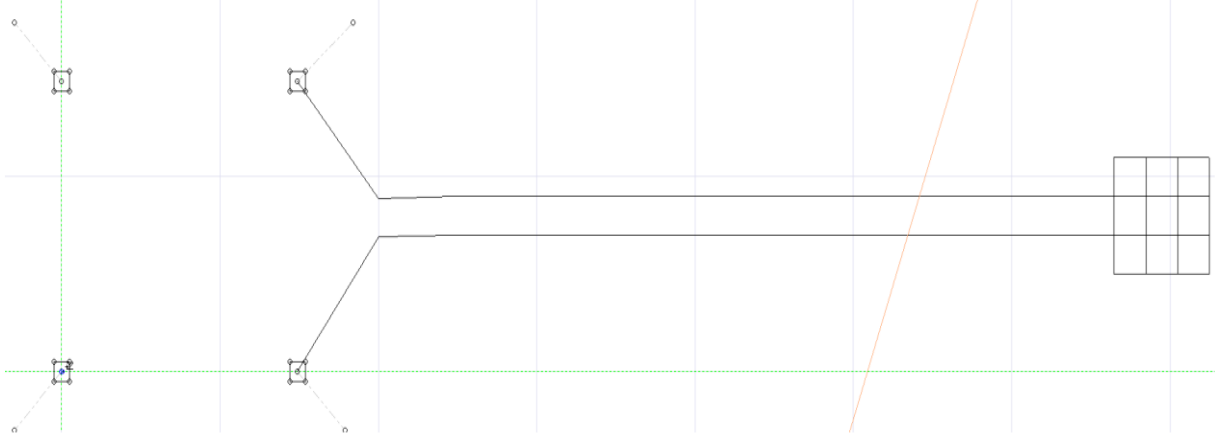


Şekil 3. Counterpoise ve Hasır Uygulaması

2.4.5. Uydur Topraklaması

Bu etkili topraklama yöntemi, direğin bulunduğu kaya veya yüksek özgül dirençli alan ile düşük özgül dirençli toprak arasında yatay bir iletkenin yerleştirilmesiyle uygulanabilir (Şekil 4). Bu uygulama, topraklama dirençlerinde önemli iyileştirmeler sağlar. Örneğin, sol tarafta 10.000 ohm-m, sağ tarafta ise

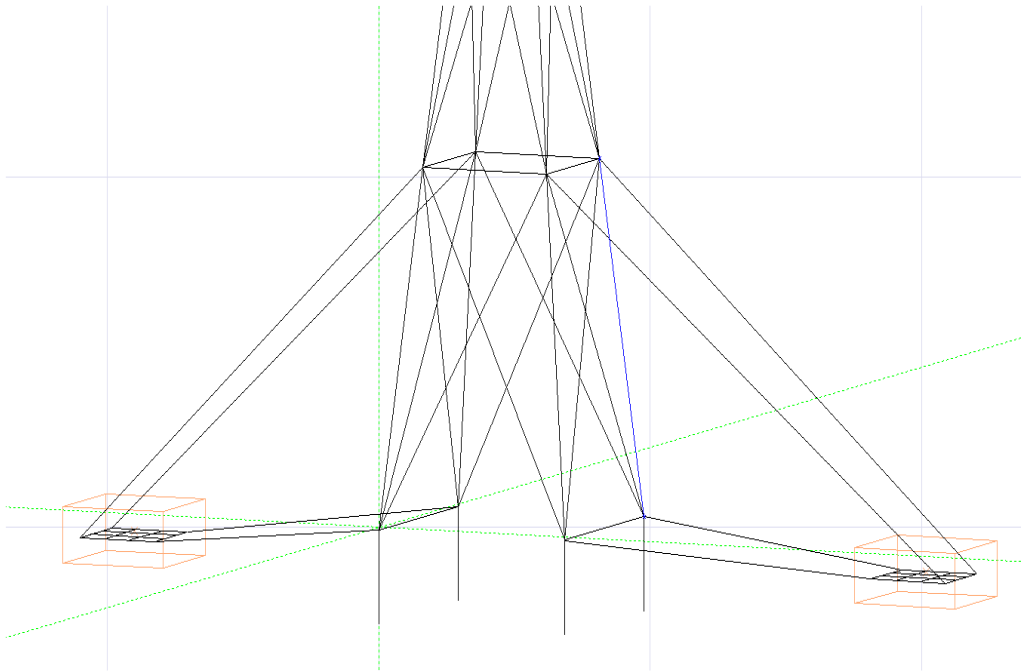
1.000 ohm-m özgül direnç değerlerine sahip bir sistemde, beş kat iyileştirme elde edilebilir. Ancak, bu yöntem her alanda uygulanabilir olmamakla birlikte, uygun yerlerde kullanıldığında parafudur ihtiyacını minimize eder. Topraklama iyileştirmesi yapılırken ilk olarak direklerde bu yöntemin uygulanabilirliği değerlendirilir. Eğer bu yöntem uygulanabilir ise, tercih edilmesi faydalıdır; ancak uygulanabilir değilse, alternatif olarak ikinci bir yöntem tercih edilmelidir. Bu ikinci yöntem, toprağın 1 metre derinliğinde kazılarak, direğin 10-50 metre uzaklığındaki 3x3 metre boyutlarındaki hasır ile bağlantı sağlanmasını içerir. Şekil 4'te topraklama metodu gösterilmiştir.



Şekil 4. Uydu Topraklaması Uygulaması

2.4.6. Guy Wires (sadece belirli hatlarda yapılacak uygulama ve yeni bir metot)

Bu uygulama, direğin yaklaşık 10 metre yüksekliğinden dört farklı noktadan toprak ile irtibat sağlanarak, topraklama değerinin azaltılması ve direğin darbe empedansının düşürülmesi yoluyla YEMD kaynaklı açmaların azaltılmasını hedefler. Böylece, direğin çevresindeki topraklama sisteminin verimliliği artırılarak, elektriksel darbe olaylarının olumsuz etkilerinin minimize edilmesi amaçlanır. Bu yöntem, topraklama değerlerinin iyileştirilmesiyle hem güvenliği arttırmakta hem de olası hasarları azaltmaktadır. Yüksek kesimler de ve nüfusun az olduğu bölgelerde kullanılacak bir yöntem olarak önerilmektedir. Şekil 5'te gösterilmiştir. Ülkemiz de şu anda bu uygulama yapılmamaktadır. Bu nedenle çalışmada bu metot detaylı incelenmiştir.



Şekil 5. Guy Wires Topraklaması

3. BULGULAR

Bu bölümde araştırmanın bulguları ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Yapılan analizler ve deneyler, araştırmanın ana hedeflerine ve hipotezlerine dair önemli bilgiler sağlamaktadır. Bulgular hem nicel hem de nitel verilerin analizini içermekte ve araştırma soruları doğrultusunda kapsamlı yanıtlar sunmaktadır. Araştırmanın başlangıcında belirlenen amaçlar çerçevesinde, YEMD kaynaklı aşırı gerilimlerin etkileri ve bu gerilimlerin azaltılmasına yönelik kullanılan yöntemlerin etkinliği üzerinde durulmuştur. Bulgular, literatürle karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve yeni bakış açıları elde edilmiştir. Sonuçlar, elektrik hatları ve enerji tesislerinde YEMD kaynaklı aşırı gerilimlerin yönetimi ve azaltılmasına yönelik stratejiler geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

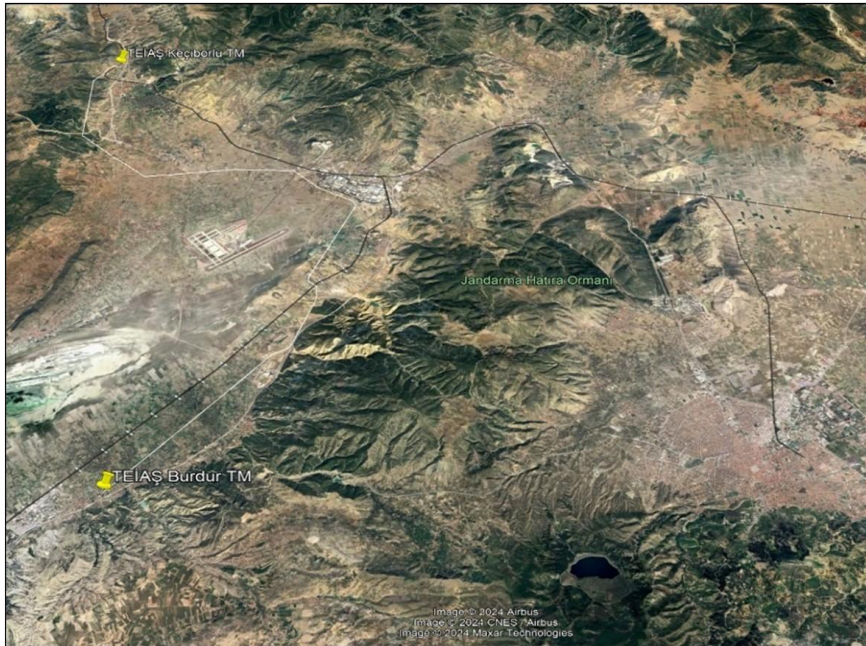
3.1. Topraklamanın iyileştirilmesi ile Yıldırım Elektromanyetik Darbelerine Karşı Koruma: Gerçekçi Yüksek Gerilim Güç Hattı Bölgesi İçin Bir Simülasyon Çalışması

Bu çalışmada, enerji iletim hatlarındaki topraklama iyileştirme işine ait özel teknik şartname incelenmiştir. Bu kapsamda, topraklama iyileştirmesi yapılacak hatların açma sayıları, MGM'den alınan YEMD yoğunluğu ve akım genlikleri değerlendirilmiş, ardından bu hatlar simüle edilmiştir. Bilgisayar ortamında yapılan bu analizlerde, hatlarda yapılacak topraklama iyileştirme çalışması sonrasında hattın YEMD' in direk düşmesi kaynaklı açmalarındaki iyileştirme oranının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma da gerçek bir enerji iletim hattı olan Isparta (Keçiborlu)-Burdur-Antalya iletim hattı, ATP-EMTP de Guy Wires topraklama metodu kullanılarak YEMD' in direk düşmesine göre topraklama ölçüm analizi yapılmıştır.

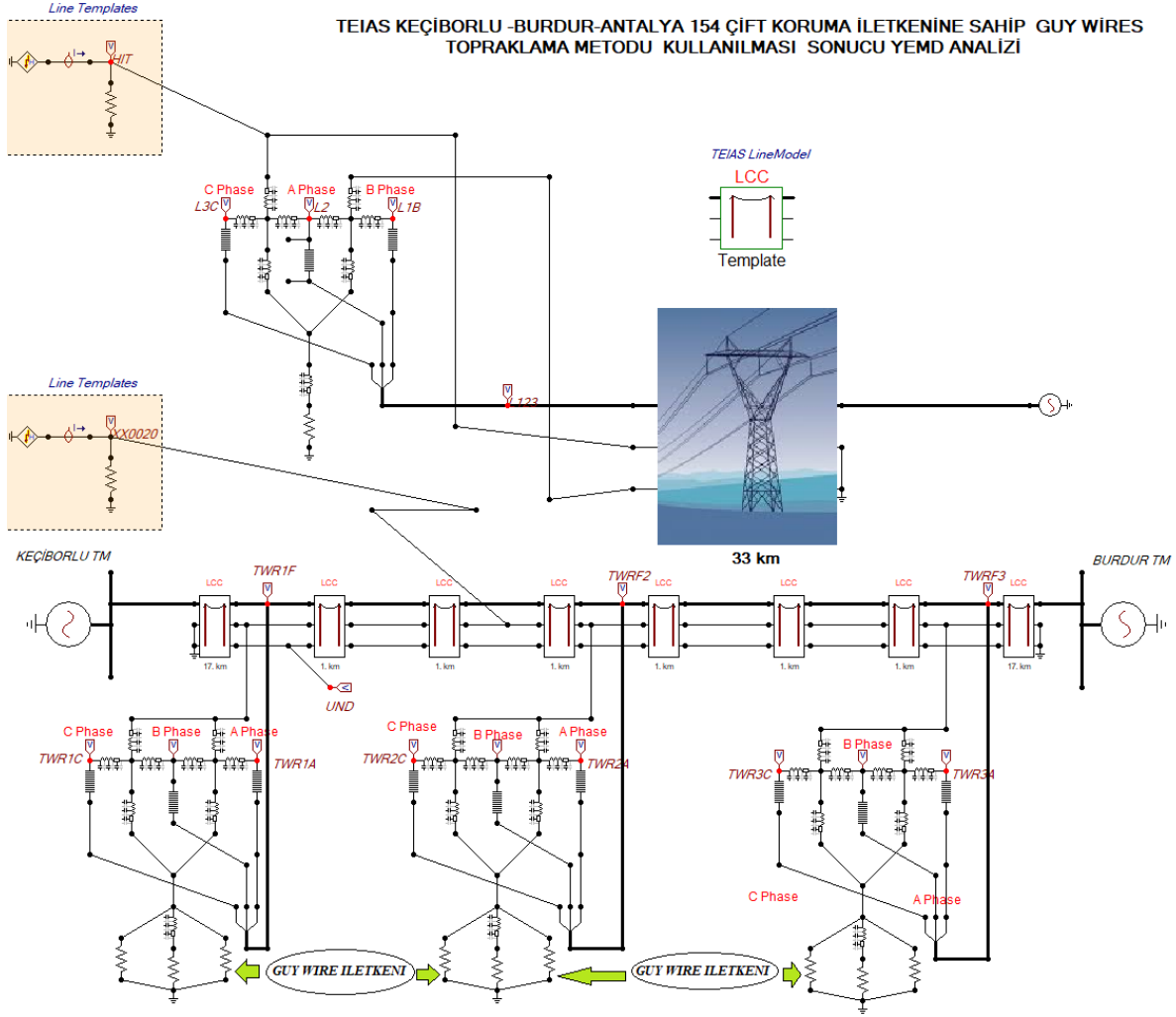
3.1.1. Simülasyon Bulguları

Bu çalışma, Antalya-Burdur-Keçiborlu enerji iletim hattı üzerindeki YEMD performansını incelemektedir. Hattın toplam uzunluğu 33 km olup, 110 adet direk bulunmakta ve bu direklerin 2020 ile 2023 yıllarına ait Ground Flash Density (GFD) değerleri sırasıyla 3.82 ve 4.47 olarak ölçülmüştür; bu değerler oldukça yüksektir. Direklerin topraklama değerlerine bakıldığında, 20 ohm' un üzerinde topraklama değerine sahip 41 direk tespit edilmiştir. Özellikle, 166, 196 ve 650 ohm gibi yüksek geçiş direncine sahip direkler dikkat çekmektedir. 2015 yılında hattın 7 açma yaptığı, ancak 2018 yılında hiç açma yaşanmadığı gözlemlenmiştir. Bu analiz, hattın mevcut durumunun değerlendirilmesi ve YEMD kaynaklı sorunların minimize edilmesine göre Guy Wires tekniği kullanılmasına yönelik yapılmıştır.

Şekil 6'da çalışmada kullanılan, hattın uydu görüntüsü gösterilmiştir. Şekil 7'de ise çalışmanın ATP-EMTP simülasyon modeli gösterilmiştir.



Şekil 6. Çalışmada simüle edilen enerji iletim hattının gerçek uydu görüntüsü



Şekil 7. Çalışmada simüle edilen 154 kV gerilim taşıyan enerji iletim hattının ATP-EMTP görüntüsü

Bu yüksek GFD değerine ve yüksek toprak geçiş direncine rağmen hattın açma sayılarının düşük olmasının temel nedenleri şu şekilde sıralanabilir:

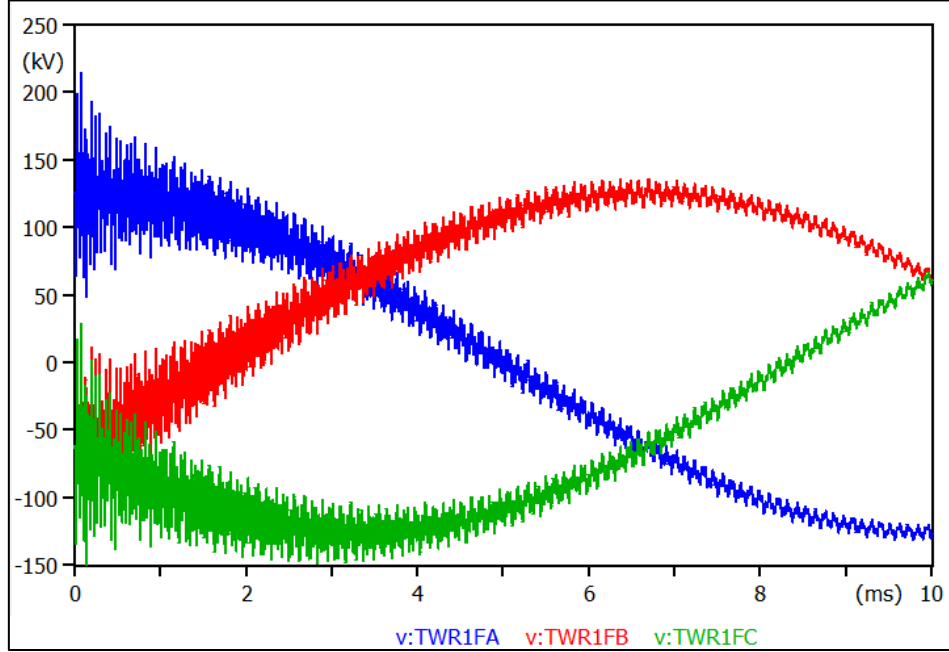
- Araziye düşen YEMD genliklerinin nispeten küçük olması,
- Direk boylarının kısa olması nedeniyle hatta YEMD düşme oranının düşük olması,
- Çift koruma teline sahip direklerin varlığı sayesinde, direklerde oluşan gerilim seviyelerinin sınırlı kalması

Özellikle 2023 yılına ait GFD ve topraklama değerleri kullanılarak, hattın YEMD performans analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, hattın mevcut performansının detaylı bir şekilde değerlendirilmesi ve YEMD kaynaklı potansiyel sorunların en aza indirgenmesi amacıyla yapılmıştır. Çalışmada, YEMD için kritik öneme sahip olan topraklama direnç değerleri, incelenen hattaki tüm direkler için sahada ölçülerek tespit edilmiştir. Simülasyon aşamasında, elektrik güç sistemine ait elemanların modellenmesi amacıyla Alternatif Geçici Program (ATP) kullanılmıştır. ATP, geçici olayların simülasyonu için son derece etkili bir araç olup, özellikle hata durumlarında zaman alanında ayrıntılı dalga biçimlerinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, ATP-EMTP yazılımı kullanılarak Antalya-Burdur-Keçiborlu 154 kV tek devreli havai iletim hattı modellenmiş ve YEMD' e karşı korunmasında yeni bir koruma yöntemi önerilerek bu yöntemin etkinliği analiz edilmiştir. Çalışma hem simülasyon sonuçları hem de saha ölçümleri doğrultusunda, önerilen yöntemin YEMD etkilerinin azaltılmasına katkısını değerlendirmiştir.

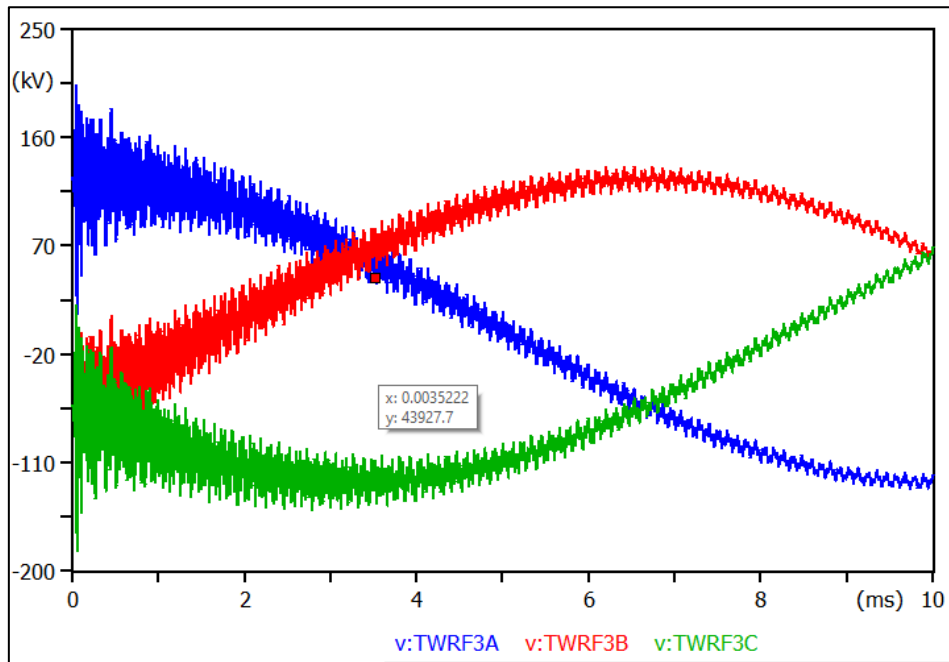
Şekil 7'de YEMD bloğunun hatta eklenmiş halinde gösterilmiştir. YEMD bloğunun içerisindeki YEMD' in akım büyüklüğü düşen darbelerin ortalaması alınarak 18.3 kA olarak tespit edilmiştir. Guy Wires

(Ayak İletkenleri), hattın bağlı olduğu direğin toprak direncine paralel olarak düşenmesi prensibidir. GW, ekranlama telleri gibi faz iletkenlerini korumaz, ancak sadece faz iletkenleri ile kuplaj faktörünü artırır, bu nedenle enerji iletim hatlarının izolasyonlarındaki gerilimi azaltır. Bu yöntemle YEMD akımının direkt oluşturduğu gerilimin azaltılması hedeflenmiştir.

Hattın ortasına (koruma iletkenine düşen) düşen YEMD, hattın iki tarafına yayılmaya başlamıştır. Düşen noktadan 2 km gerisinde fazlar üzerinde indüklenen gerilim Şekil 8’de gösterilmiştir. Düşen noktadan 4 km ilerisinde fazlar üzerinde indüklenen gerilim Şekil 9’da gösterilmiştir.

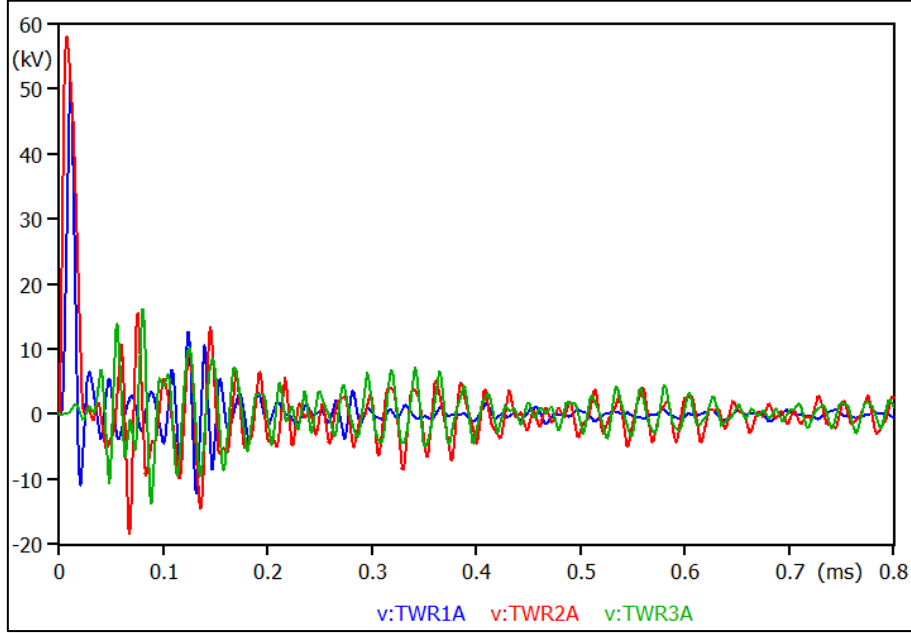


Şekil 8. YEMD darbesinin düştüğü bölgeden 2 km gerisinde fazlar üzerindeki indüklenen gerilim (Burdur TM 16 km uzakta L₁: TWR1FA, L₂: TWR1FB L₃: TWR1FC)



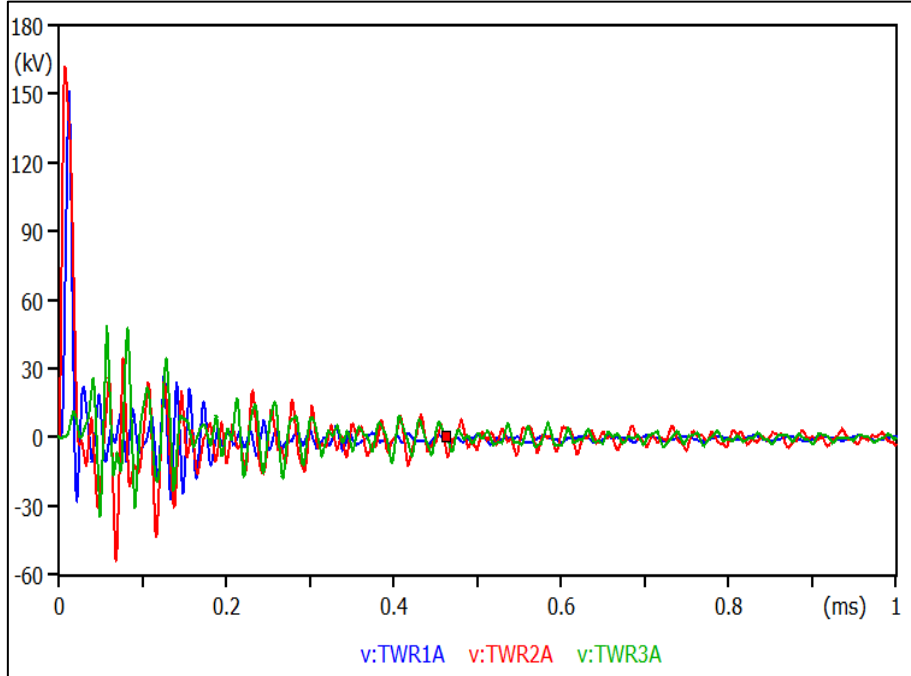
Şekil 9. YEMD darbesinin düştüğü bölgeden 4 km gerisinde fazlar üzerindeki indüklenen gerilim (Keçiborlu TM 16 km uzakta L₁: TWR3FA, L₂: TWR3FB L₃: TWR3FC)

Şekil 10'da ise GW iletkeni kullanılması durumunda hattın darbeye yakınlığına göre L_1 fazlarının izolatörleri ucundaki oluşan gerilim gösterilmiştir.



Şekil 10. YEMD darbesinin düştüğü bölgedeki direklerde Guy Wires iletkeni kullanılması sonucu izolatör ucu gerilim seviyesi (Darbeye yakın L_1 fazı sıralaması TWR2A, TWR1A, TWR3A)

Şekil 11'de ise GW iletkeni kullanılmaması durumunda hattın darbeye yakınlığına göre L_1 fazlarının izolatörleri ucundaki oluşan gerilim gösterilmiştir.



Şekil 11. YEMD darbesinin düştüğü bölgedeki direklerde Guy Wires iletkeni kullanılmaması sonucu izolatör ucu gerilim seviyesi (Darbeye yakın L_1 fazı sıralaması TWR2A, TWR1A, TWR3A)

Simülasyon sonuçlarına göre direklerde GW iletkeni kullanılmaması durumunda fazların bulunduğu izolatör uçlarındaki atlama gerilimi 180 kV iken, GW iletkeni kullanılması durumunda ise bu değer 60 kV 'ya kadar düştüğü görülmüştür.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çalışmada kullanılan direk parametreleri, faz iletkenleri, koruyucu iletkenler, izolasyonlar ve temel direnç verileri Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) tarafından sağlanmıştır [21]. Bir GW (ayak iletkenleri) kullanıldığında, fazın maksimum kuplaj faktöründe %20'ye kadar bir artış sağlanabilir. Bu durum, izolatör üzerinde deşarja neden olan gerilimi azaltarak enerji iletim hattının YEMD'e karşı korunma performansını artırmaktadır. 220 kV'luk bir iletim hattının izolatöründeki gerilim, bir veya iki GW kurulumuyla %13 ila %20 oranında düşüş göstermektedir [23]. Ek olarak, guy wires, faz iletkenleri arasındaki kuplaj faktörünü artırarak YEMD akımının bir kısmını yeni toprak iletkeni kolları aracılığıyla toprağa aktarılmasını kolaylaştırmaktadır [24]. Bu sayede, toprak direncine paralel bir yapı oluşturularak eşdeğer toprak direnci azaltılmaktadır. Hat parafudurlarının her bir direk için kullanılması durumunda ortaya çıkan yüksek yatırım maliyeti göz önünde bulundurulduğunda, GW gibi alternatif korunma yöntemleri, kolay kurulumu ve düşük maliyeti sayesinde giderek daha fazla tercih edilmelidir. Bu çalışma kapsamında, 154 kV'lık enerji iletim hatlarında GW uygulamaları incelenmiş ve bu yönetime dair çözüm önerileri geliştirilerek yeni bir bakış açısı sunulmaya çalışılmıştır. Sonuç olarak GW tekniği kullanıldığı takdirde, izolatör ucundaki atlama geriliminde %66'lık bir gerilim düşmesini sağlamıştır.

REFERANSLAR

- [1] B. Raphael, Louro P., And Paulino J., Lightning Performance of a Critical Path from A 230-Kv Transmission Line with Grounding Composed by Deep Vertical Electrodes, Electric Power Systems Research, Vol. 195, 2021.
- [2] G. Leonid, Markovskı B. And Todorovskı M., Lightning Performance of Multiple Horizontal, Vertical and Inclined Grounding Electrodes, In IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 37, No. 5, Pp. 3782-3791, Oct. 2022.
- [3] J.C. Maxwell, A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, vol. 155, pp. 459-512, 1865.
- [4] M.A. Uman, D.K. Mclain, Magnetic Field of Lightning Return Stroke, Journal of Geophysics Research, Vol. 74, 1969.
- [5] R. Lundholm, Induced Over voltages on Transmission lines and their bearing on the lightning performance of medium voltage networks, Duplic Goteborg, 1955.
- [6] F. Heidler, Travelling current source model for LEMP calculation, Proc of the 6th Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Zurich, March 5-7, 1985.
- [7] H.K. Hoidalen, Analytical Formulation of Lightning-Induced Voltages on Multiconductor Overhead Lines Above Lossy Ground, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol.45, no.1, pp.92-100, Feb. 2003.
- [8] IEEE Standards 1410 "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines", 2004.
- [9] K. Ishimoto, F. Tossani, F. Napolitano, A. Borghetti, C.A. Nucci, LEMP and ground conductivity impact on the direct lightning performance of a medium-voltage line. Electr. Power Syst. Res. 2023.
- [10] T. Cakil, H.F. Carlak, S. Ozen, Protection Analysis of Surge Arresters and Isolators Against Over Voltages Caused by Lightning Electromagnetic Pulses, International Conference on Advances and Innovations in Engineering, Elazig, Turkey, 10-13 May 2017.
- [11] C. Jinxin et al., Comprehensive Assessment of Lightning Protection Schemes for 10 kV Overhead Distribution Lines, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 3, pp. 2326-2336, June 2022.
- [12] T. Cakil, H.F. Carlak, S. Ozen, The Analysis of Transient Phenomena on Power Transmission Lines Due to Lightning Electromagnetic Pulses, Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS) 2017, St. Petersburg, Russia, 22,25 May 2017.

-
- [13] G. Jun, W.C. Xie, Y. Xie and Tkachenko S., An Efficient Model of High-Frequency Electromagnetic Field Coupling to Multiconductor Transmission Lines with the Presence of the Lossy Ground, in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 64, no. 6, pp. 2261-2272, 2022.
- [14] T. Cakil, H.F. Carlak, S. Ozen, The Indirect Effect of Lightning Electromagnetic Pulses on Electrostatic, Electromagnetic Fields and Induced Voltages in Overhead Energy Transmission Lines. Appl. Sci., 14, 3090, 2024.
- [15] S. Kauche and B. Nekhoul, Modelling of Lightning Surges on A Grounding System of a Tower Cascade. Electrical Engineering. 2023.
- [16] C. Li, et al., Electromagnetic Fields of Lightning Return Stroke to Wind Turbines with Discontinuous Impedance Model, Electric Power Systems Research, Volume 233, 2024.
- [17] G. Leonid, Markovski B. And Todorovski M., Lightning Performance of Multiple Horizontal, Vertical and Inclined Grounding Electrodes, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 5, pp. 3782-3791, Oct. 2022.
- [18] L. Prikler and H. K. Hoidalen ATPDraw version 6.1 for Windows XP/7/8, 2024, <http://www.atpdraw.net/index.php> [Son erişim tarihi: 22.06.2024]
- [19] B. Raphael, Louro P., And Paulino J., Lightning performance of a critical path from a 230-kV transmission line with grounding composed by deep vertical electrodes, Electric Power Systems Research, Vol. 195, 2021.
- [20] N. Arı, Ş. Özen, Elektromanyetik Uyumluluk, ISBN 978-9944-341-72-1, Palme Yayıncılık, 2008.
- [21] TEİAŞ, Türkiye Ulusal Elektrik Ağındaki Havai Hatların Trafoların ve Jeneratörlerin Elektrik'i Karakteristiği, Sistem Araştırma ve Kontrol Müdürlüğü, 2024.
- [22] Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Tahminler Daire Başkanlığı, Analiz ve Tahminler Şube Müdürlüğü, <https://www.mgm.gov.tr/sondurum/yildirim-takip.aspx> [Son erişim tarihi: 18.06.2024]
- [23] B. Zhang, Li C., Liu Z. And He J., Analysis of Transient in Secondary Cable Due to a Direct Lightning Strike on Grounding Grid, in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 65, no. 4, pp. 1183-1190, Aug. 2023.
- [24] T. Çakıl, H. F. Carlak, and Ş. Özen, "Modeling of Power Network System of The High Voltage Substation: a simulation study", IJEAS, vol. 7, no. 3, pp. 39–57, 2015.
- [25] Y. Eroğlu, S. Çakıl, Türkiye'deki Yıldırım Ve Şimşeklerin Akım Düzeyleri Ve Sayıları Hakkında İnceleme, Uluslararası Katılımlı V. Meteorolojik Uzaktan Algılama Sempozyumu (UZAKTEM), pp. 708-727, Antalya, Türkiye, 14-17 Kasım 2023.
- [26] T. Cakil, H. F. Carlak and S. Ozen, "Protection against Lightning Electromagnetic Pulses Using Surge Arresters: A Simulation Study for the Realistic High-voltage Power Line Region," 2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), pp. 2465-2473 Hangzhou, China, 2021.