

YILDIRIM ELEKTROMANYETİK DARBESİNİN ENERJİ TESİSLERİNDE MEYDANA GETİRDİĞİ GEÇİCİ OLAYLARIN ANALİZİ ve KORUMA ÖNLEMLERİ

Turan Çakıl, H. Feza Carlakve Şükrü Özen

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Akdeniz Üniversitesi, Antalya
{fezacarlak, sukruozen}@akdeniz.edu.tr

ÖZET

Çalışmada yıldırım elektromanyetik dalgasının (YEMD), enerji nakil hatlarına veya güç sistemlerine yakın yerlere düşmesi sonucunda oluşturduğu etkiler incelenmiştir. Problemin modellenerek nümerik olarak çözülmesinde ATP-EMTP programı kullanılmıştır. Örnek bir güç şebekesinin tek hat şemasından yararlanarak bir bölümüne YEMD uygulanmıştır. Simülasyon çalışmasında, paratoner bulunmayan bir enerji tesisi veya yüksek kesimde bulunan bir enerji nakil hattının faz iletkenine YEMD düşmesi durumu incelenmiştir. YEMD'in enerji tesisine bir kez düştüğü düşünülmüştür. YEMD kaynağı için ATP programında bulunan Heidler dalga modeli ve rampa fonksiyonları kullanılmıştır. Voltaj kademesi 380/154 kV gerilim değerine sahip indirici bir transformatör merkezi (TM) ve merkeze bağlı enerji şebekesinde bulunan enerji nakil hatları birebir programda modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar YEMD' den kaynaklanan voltajların 154 kV güç sistemi için yalıtım aşınma seviyesinin üzerinde MV' lara ulaşabileceğini göstermiştir.

1. GİRİŞ

YEMD, enerji iletim ve dağıtım sistemlerinde aşırı gerilim oluşumunun en önemli nedenidir. Temel olarak YEMD, bulutların birbiri ile elektrostatik etkisinden dolayı oluşan bir doğa olayıdır. Yüklü durumda olan bulutlar yeryüzüne yakın yerlerde bu yüklenmeleri boşaltırlar. Bu boşalma, milyonlarca voltluğun gelişmesinden kaynaklanan dev bir kıvılcım olup büyük bir kondansatörün dielektrik parçalanmasına benzemektedir. YEMD boşalma gerilimi bulut ile toprak arasında milyonlarca voltla başlayabilirler. Bu aşırı gerilimler binalara, ağaçlara, enerji tesislerine ve enerji nakil hatlarına isabet etmektedir [1]. YEMD geçici (transient) bir olay olarak sınıflandırılır [2]. YEMD

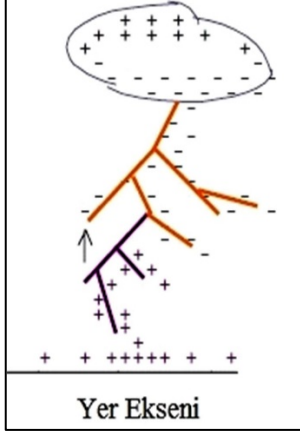
etkisini anlayabilmek buna neyin sebep olduğunu ve nerede oluşacağı hakkında bilgi sahibi olmak gerekir [3]. Enerji nakil hatlarının (77, 154 kV) yıldırım darbe analizi, elektrik direklerinde oluşan yıldırım aşırı gerilimlerinin Lablas dönüşümü ile analizi, direk tiplerine bağlı olarak yıldırım aşırı gerilimlerinin analizi, yıldırım elektromanyetik dalgaların neden olduğu aşırı voltajlara karşı Parafudr ve izolatörlerin koruma analizi üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir [4-8]. Bu çalışmada ise YEMD darbesinin 380/154 kV bir indirici TM' ye ait enerji nakil hattının belirli bir bölgesine düşmesi sonucundaki geçici (transient) olaylar incelenmiştir.

2. TEORİK ANALİZ VE PROTOTİP MODELİ

2.1. YEMD Yapısı

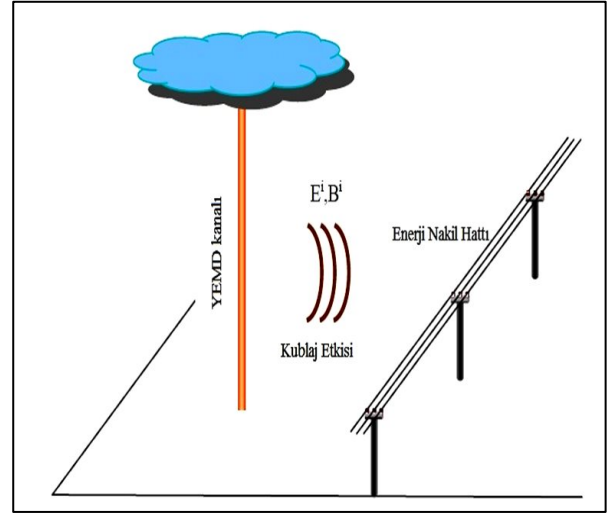
YEMD darbesinde bulunan enerji miktarı çok yüksektir. Bir enerji nakil hattına veya enerji tesislerine tek darbe olarak bile düşse son derece yıkıcı hasarlar verebilmektedir. YEMD, dağıtım ve iletim hatlarındaki kesintilerin başlıca nedenlerinden biridir [9]. YEMD darbesi bir güç hattına düştüğünde büyük bir akım kaynağı ile elektrik hattı devresi arasındaki büyük bir anahtarı kapatmak gibidir. Bu anahtarın kapanması devrenin koşullarında ani bir değişime neden olarak geçici bir (transient) durum oluşturur. YEMD darbesi enerji nakil hattına (ENH) yakın yerlere düşmesi durumunda YEMD darbesi kaynaklı akım yüzünden ortamda büyük bir manyetik alan oluşur. Bunun sonucunda

ENH ile YEMD arasında kublaj etkisi meydana gelir. (Şekil 2.) Kublaj etkisi sonucunda yine geçici bir (transient) olay oluşur. YEMD darbesinin ENH etkisinin araştırılması çok önemlidir. Genellikle yüksek rakımlı bölgelerde bulunan ENH için çok ciddi bir sorun olabilir. YEMD darbesinin bir yapıya düşme ihtimali yüksekliği ile birlikte artmaktadır [10].



Şekil 1. YEMD darbesinin düşme olayı

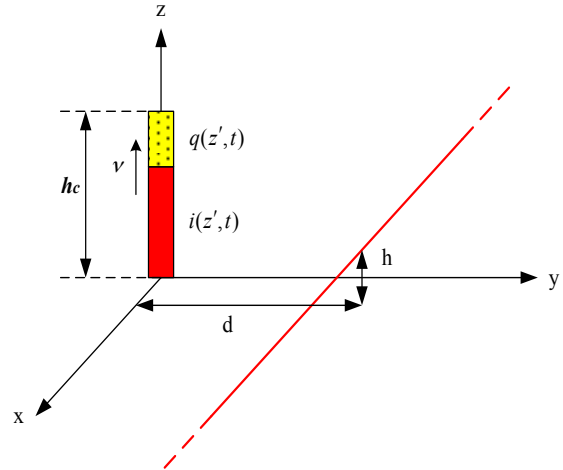
YEMD darbesi bulutlar ile yer arasında tek vuruş veya çok sayıda bileşen vuruşu şeklinde meydana gelebilir (Şekil 1.). Çok vuruşlu YEMD darbeleri 3-4 vuruşa sahiptir. Darbeler genellikle 40 ila 50 ms aralıklarında meydana gelir. YEMD darbeleri genellikle 10 kA ile 20 kA aralığında ölçülen tipik pik akımlarına sahiptirler [10]. YEMD darbesi pik akımlarına saniyenin birkaç milyonda birinde ulaşır. Sönümlenmesi ise saniyenin binde birinde meydana gelir. YEMD darbesinden korunma konusunda ulusal ve uluslararası standartların neredeyse tamamı İsviçre’de yapılan yıldırım akım ölçümlerine dayanmaktadır.



Şekil 2. YEMD darbesinin ENH kublaj etkisi

2.2. YEMD’ in Matematiksel Modeli

YEMD teorik olarak (Şekil 3)’de gösterilen modelle temsil edilmektedir.



Şekil 3. YEMD darbesi matematiksel modeli [7].

$$\frac{dv^\phi}{dx}(x,t) + l' \frac{di}{dt}(x,t) = 0 \quad (1)$$

$$c' \cdot \frac{dv^\phi}{dx}(x,t) + \frac{di}{dt}(x,t) = c' \cdot \frac{d\phi'(x,h,t)}{dt} \quad (2)$$

Burada;

ϕ' : Skaler potansiyel gösterimi

l' : Hattın endüktans gösterimi

c' : Hattın kapasitans gösterimi

YEMD, ATP modelinde yıldırım yolu empedansı olan paralel direnç ve akım kaynağı olarak modellenmektedir. YEMD matematiksel olarak ise çeşitli nümerik formüllerle gösterilmektedir. Ancak bu çalışmada ATP programında bulunan Heidler fonksiyonu bloğu kullanılmıştır. (Denklem 3.), (Denklem 4.). YEMD çalışmada üç darbeleri olarak modellenmiştir [7-8].

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t - \tau_1)}{(t/\tau_2)^n + 1} e^{-t/\tau_2} \quad (3)$$

$$\eta = e^{\left[(\tau_1 - \tau_2) \left(n \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) \right]^{\frac{1}{n}}} \quad (4)$$

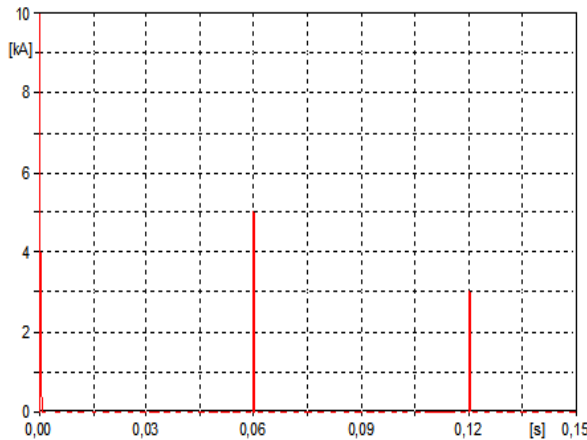
I_0 : YEMD akımının tepe değeri

τ_1 : Akım yükselme zamanına bağlı zaman sabiti

τ_2 : Akımın gecikme zamanına bağlı zaman sabiti

n : Akım diklik faktörü' dür.

Çalışmada kullanılan YEMD darbesi birinci darbesi 10 kA olup 0,6 ms kadar sürmekte, ikincil darbe 5 kA olup 0,6 ms'den başlayarak aniden düşmekte ve 3 kA lik üçüncül darbe ise 0,12 ms'den başlayıp aniden sönmekte olup YEMD darbeleri Heidler modeli kullanılarak benzetim programında modellenmiştir (Şekil 4.).



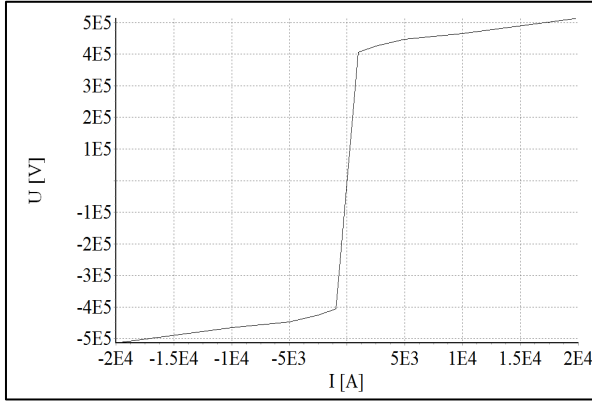
Şekil 4. YEMD darbesinin ATP simülasyonundaki dalga formu

3. ENERJİ TESİSLERİNİN YEMD'DEN KORUNMA YÖNTEMLERİ

YEMD' den korunmak için enerji tesislerinde ve ENH' larda belirli önleyici mekanizmalar kullanılabilir. Yüksek gerilim (YG) taşıyan iletim hatlarını korumak için kule yapısındaki direklerin tepe noktasından koruma iletkenleri yerleştirilmektedir. Bu koruma iletkeni, toprakla bağlantısı sağlanarak direğin üst tarafı teorik olarak bir Faraday kafesi olarak modellenmektedir. Bu topraklanmış koruma iletkenleri, faz iletkenlerine YEMD darbelerinin düşmesini engellemek için kullanılmaktadır [10]. Fazların taşınmasında kullanılan izolatörlerin sınır uçları demir çubuklarla eklenti yapılarak (ark boynuzları) YEMD' de karşı fazlar koruma altına alınabilir. Ancak bazı durumlarda YEMD fazlara isabet etmekte veya gerilim atlama şeklinde de etki etmektedir [8].

3.1. Parafudrların Yapısı ve Modeli

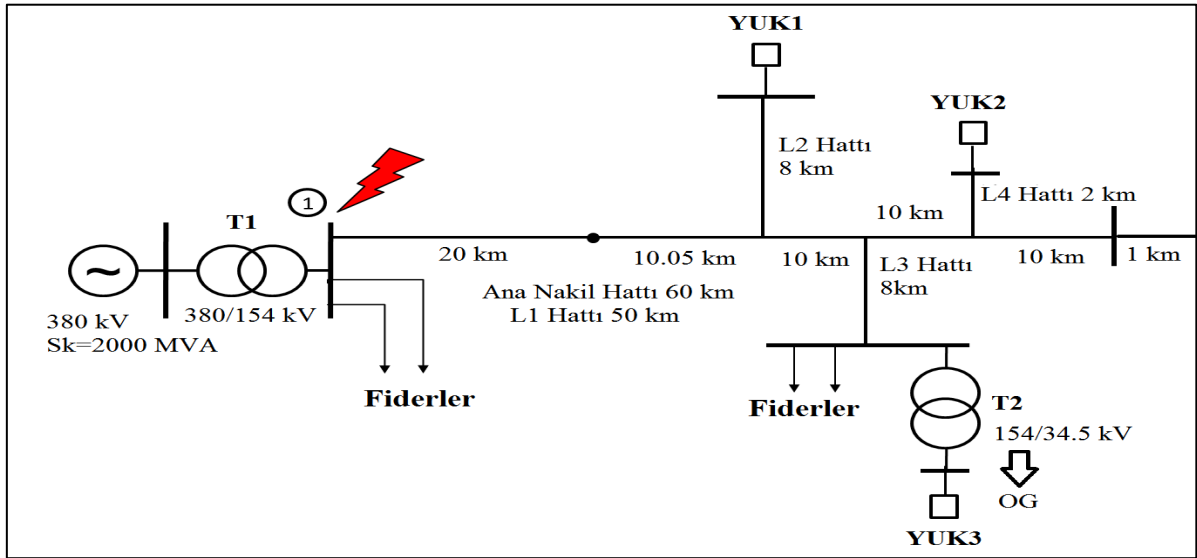
Bir YEMD darbesi, enerji tesisi veya ENH' ye düşerse bunları korumanın tek yolu parafudrlardır. Parafudrlar lineer olmayan direnç yapıları sayesinde bu pik akımların zemine çekilmesini sağlarlar. Parafudrların çalışma prensibi, her zaman devrede açık konumda bulunmalarıdır. Güç hattındaki veya güç tesisindeki gerilim ne zaman ki nominal voltaj değerini aşarsa, enjekte olan YEMD akımını toprağa ileten düşük dirençli bir yol oluştururlar [11]. Çalışmada kullanılan parafudr tipleri ABB firmasının YG tipindeki ELK-14 parafudru ile orta gerilim (OG) parafudru olan ABB Polim-D tipi metal oksit varistör (MOV) tipinde parafudr ATP programına uyarlanmıştır [12].



Şekil 5. ATP programındaki ABB- ELK14 tipi parafudrunun akım-gerilim karakteristik grafiği

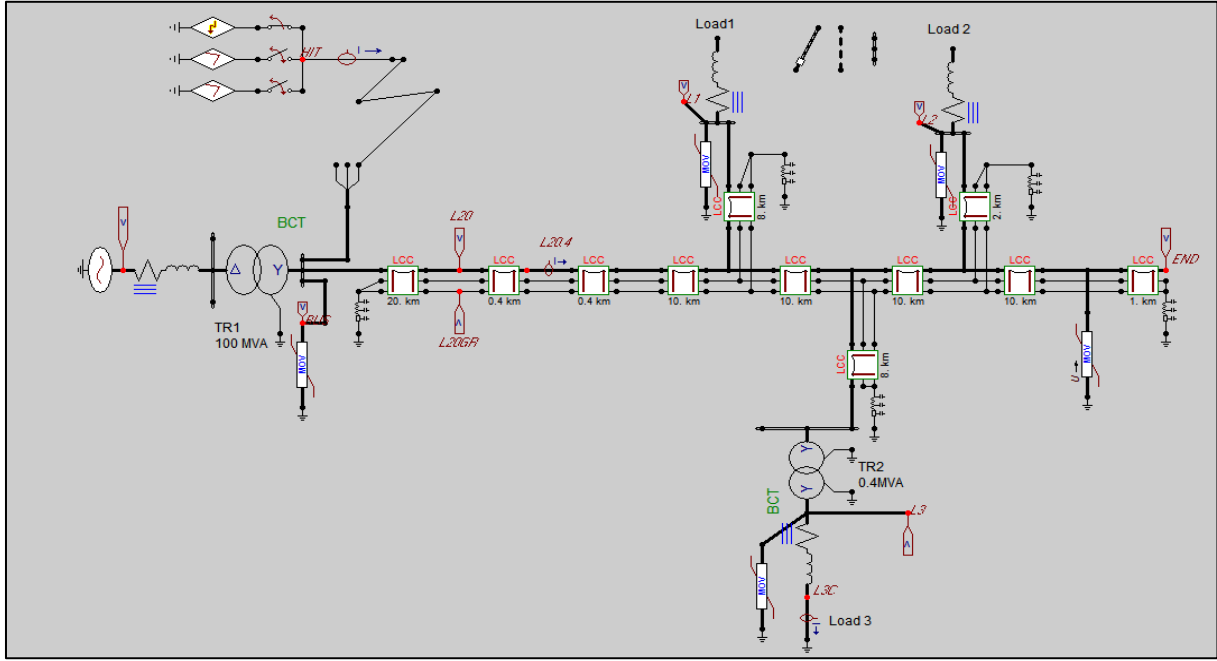
4. ENERJİ TESİSİ ve ENERJİ NAKİL HATLARININ ATP MODELİ

YEMD darbe düşmelerinin enerji sistemleri üzerindeki etkisinin görülebilmesi için bir test sistemi ATP-EMTP programı kullanılarak modellenmiştir. Test edilen sistem bir YG indirici TM ve buna bağlı olan ENH' den oluşmaktadır. 380/154 kV indirici oto transformatör ile 154 kV'luk gerilime sahip çatal pilon tipinde direk tiplerinden oluşan ENH, programa birebir aktarılmıştır. Test edilen sistemde, YEMD' in ana nakil hattının bağlı olduğu bus barasına düştüğü kabul edilmiştir.



Şekil 6. Modellemede Kullanılan YG Şebekesinin Tek Hat Diyagramı

Modellemede kullanılan tek hat şeması (Şekil 6.)' da gösterilmiştir. ATP programına birebir aktarılan bu güç şebekesinin benzetim düzlemi ise (Şekil 7.)' de gösterilmiştir.



Şekil 7. YG güç şebekesinin ATP-EMTP modeli

4.1. Enerji Nakil Hatlarının Modeli

Çalışmada 154 kVlık ENH'lar kullanılmıştır. İletkenler ve koruma iletkenleri birebir programa aktarılmıştır. ATP programında ENH'lar LCC bloğunda bulunan J-Marti modeline göre yapılmıştır. Bu modelin kullanılmasının nedeni geçici (transient) analizlerde genellikle bu model kullanılmaktadır [13]. Modellemede kullanılan direkler ise 3'lü demet yapısına sahip iletkenlerden oluşan çatal pylon direklerdir (Şekil 8.). Faz iletkeni olarak ise 477 MCM (Hawk) iletkeni kullanılmıştır [14].

4.2. Yüklerin Modellenmesi

Modellenen enerji sisteminde Yük1, Yük2 ve Yük3 olmak üzere 3 tane yük modellenmiştir. Yük1 için yaklaşık 5 MW aktif güç, 2,5 MVAR reaktif güç, Yük2 için yaklaşık 4 MW aktif güç, 2 MVAR reaktif güç ve Yük3 için de yaklaşık 40 kW aktif güç ve 20 kVAR reaktif güç değerlerine sahip endüstriyel değerler girilmiştir. Yüklerin güç faktörleri TEDAŞ'ın belirlediği güç faktörüne göre belirlenmiştir. Yükler ATP programının RLC bloğu ile modellenmiştir [12]. ATP programında R ve L değerleri girilerek

güçler tespit edilir. Bu değerler (Denklem 5.) ve (Denklem 6.) kullanılarak elde edilmiştir.

$$R = \frac{U^2}{P} \quad (5)$$

$$L = \frac{U^2 / Q}{2\pi \cdot f} \quad (6)$$

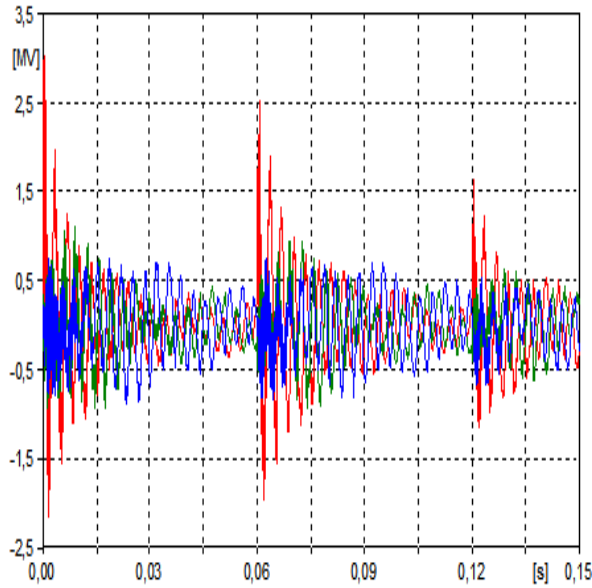
5. SONUÇLAR

Bu çalışmada iki farklı durum incelenmiştir. Birinci durumda 380/154 kV indirici TM' de bulunan bara hattının L1 fazına, YEMD düşmesi sonucundaki geçici olaylar incelenmiştir. İkinci durumda ise aynı bölgeye düşen YEMD darbesinin koruma elemanları devrede iken, meydana gelen geçici olaylar incelenmiştir. Bunun sonucunda iki durum birbiriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan güç şebekesinin ATP-EMTP şeması (Şekil 7.)' de gösterilmiştir.

5.1. Senaryo I

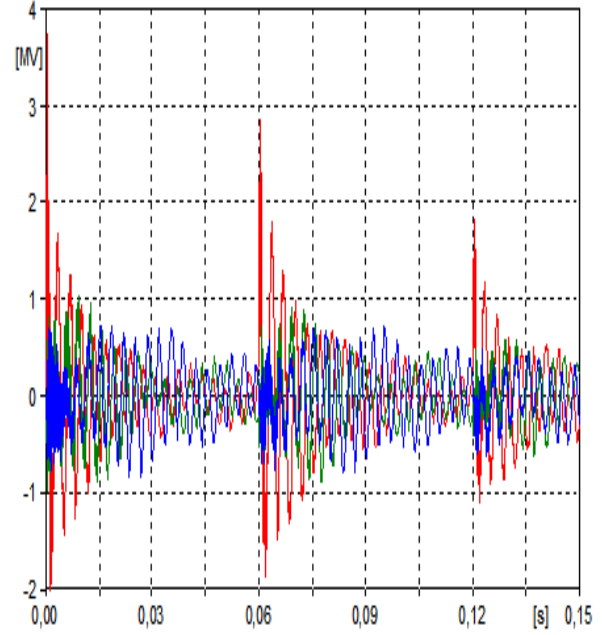
Beklendiği gibi YEMD' de karşı parafudr sistemlerinin bulunmadığı durumlarda bu etki yıkıcıdır. Bu yıkıcı etki hat yapılarında

izolasyon arızasına ve bağlı olan elektriksel ekipmanlara (transformatörler, kesiciler, röleler) hasar verir. Senaryo I' de 380/154 kV indirici trafo merkezinde bulunan bara hattının L1 fazına YEMD düşmesi sonucunda (parafudrların devrede olmaması koşulu) geçici olaylar incelenmiştir. Bu olay incelenirken ilginç bir ayrıntı göze çarpmıştır. Trafo merkezinin bağlı olduğu enerji nakil hattı boyunca meydana gelen yansımalar dalgalanmayı artırmıştır ve yüksek değerlere ulaşan gerilimler meydana gelmiştir.

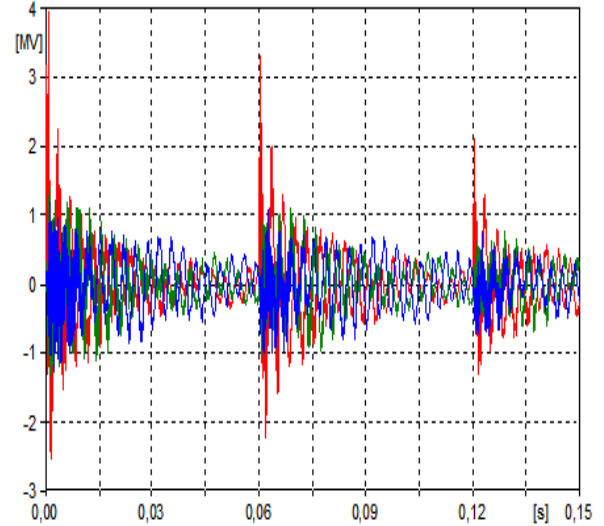


Şekil 8. I. Senaryoya göre TM'ye 20 km uzakta YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilim.

(Şekil. 7)' de gösterilen YG güç şebekesinde bulunan L20 voltaj probundan okunan değer (Şekil 8.)' de gösterilmiştir. Yük1' in bulunduğu bara da bulunan L1 voltaj probundan okunan değer (Şekil 9.)' da gösterilmiştir.

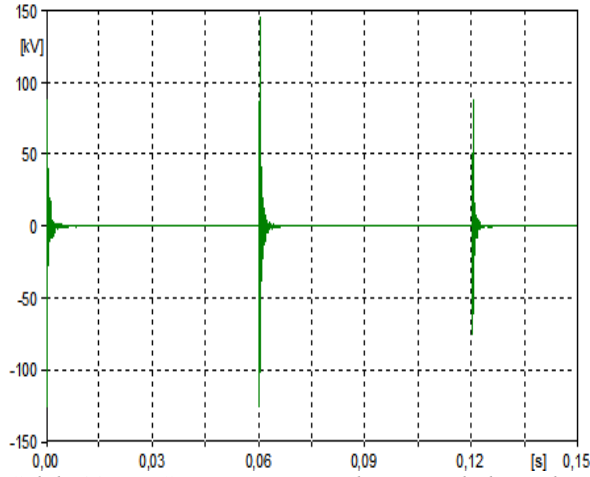


Şekil 9. I. Senaryoya göre Yük1'in bağlı olduğu barada YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilim.

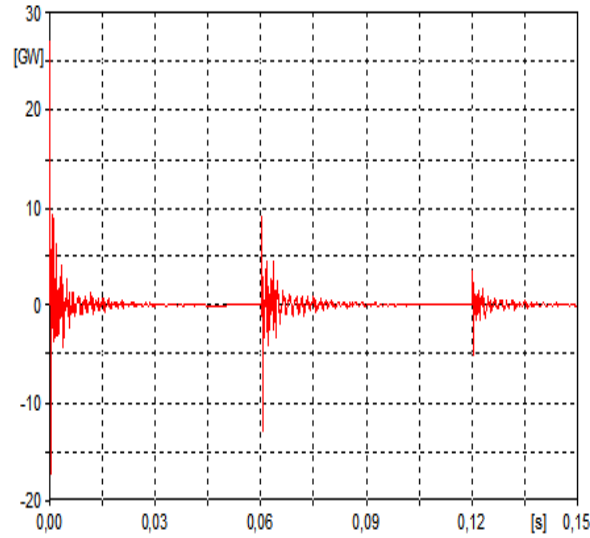


Şekil 10. I. Senaryoya göre ana barada YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilim.

(Şekil 7.)' de gösterilen YG güç şebekesinde bulunan ana baranın ölçümünde kullanılan VBUS voltaj probundan okunan değer (Şekil 10.)'da gösterilmiştir. Güç şebekesine YEMD darbesi düştüğü anda ana hattın sonunda bulunan enerji nakil hattının koruma iletkeninde indüklenen gerilim (Şekil 11.)'de gösterilmiştir. Bu sonuç izolatörler için belirlenen sınır gerilimidir [8]. Modellenen güç şebekesine, düşen YEMD darbesinin enerji kapasitesi ise (Şekil 12.)'de gösterilmiştir.



Şekil 11. I. Senaryoya göre koruma iletkeninde indüklenen YEMD kaynaklı kısa süreli oluşan aşırı gerilim

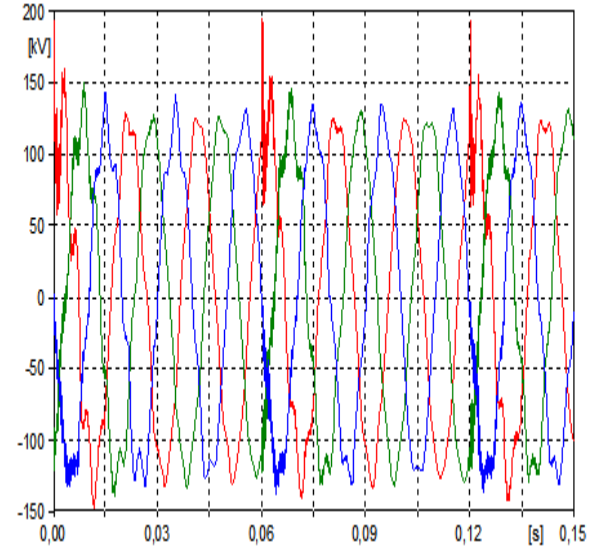


Şekil 12. I. Senaryoya göre güç şebekesine düşen YEMD darbesinin enerji kapasitesi.

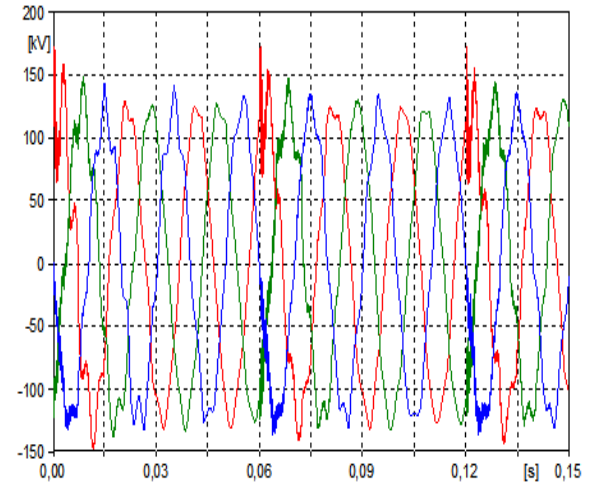
5.2. Senaryo II

YEMD darbesi senaryo I'deki gibi aynı bölgeye düşmekte ancak bu senaryoda farklı olarak parafudr sistemleri devrededir. Buna göre YEMD darbesinin sistemde nasıl absorbe edildiği gösterilmiştir. Parafudrların enerji tesisleri için çok önemli bir donanım olduğu bu analizle görülmüştür. Sonuçlarda parafudrların güç sistemlerinde YEMD darbelerinin oluşturduğu voltaj seviyelerinde büyük düşüş sağladığı görülmektedir. Parafudrlar genellikle birkaç metre ile on metre arası sınırlı bir bölgeyi aktif olarak korurlar. Bu koruma bölgeleri IEC 60099-5 standardına göre yalıtım koordinasyon gereksinimlerini

tamamlayan maksimum ayırma mesafesi olarak tanımlanır. Bu nedenle parafudrlar korunacak cihazlara yakın konulmalıdır. Genellikle parafudrlar, enerji tesislerinde önemli bir yapı olan transformatörlere yakın bölgelere yerleştirilmektedir [12].



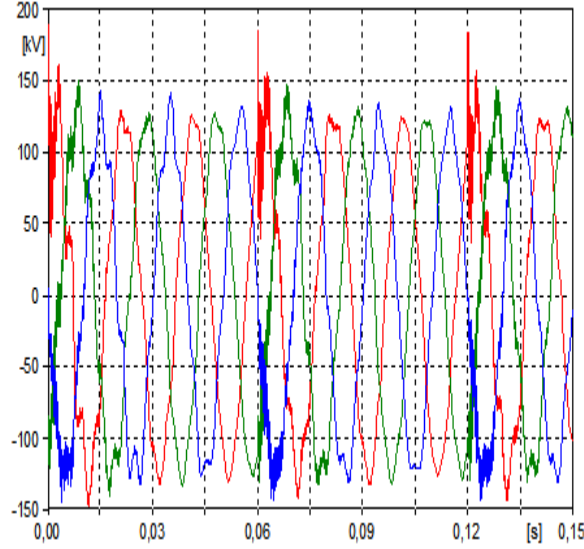
Şekil 13. II. senaryoya göre TM'ye 20 km uzakta YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilimin absorbe edilmesi.



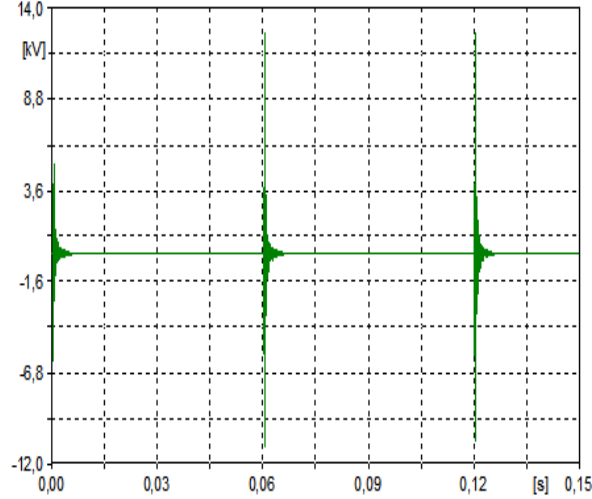
Şekil 14. II. senaryoya göre yük1'in bağlı olduğu YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilimin absorbe edilmesi.

Modellenen güç şebekesinde (Şekil 7.), bulunan parafudrların devrede olduğu durumda ana hatta YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilim absorbe edilmiştir (Şekil 13.). Aynı durumda yük1'in bağlı olduğu baradaki aşırı gerilim (Şekil 14.)'de gösterildiği gibi absorbe edilmiştir. II senaryo'ya göre ana baranın L1 fazına

düşen YEMD darbesinin oluşturduğu aşırı gerilim (Şekil 10.), parafudrlar sayesinde absorbe edilmiştir (Şekil 15.). Aynı durumda ana hattın sonunda bulunan direğin koruma iletkeninde indüklenen gerilimin, parafudrlar sayesinde düştüğü görülmektedir (Şekil 16.).



Şekil 15. II. senaryoya göre ana barada YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilimin absorbe edilmesi.



Şekil 16. II. senaryoya göre koruma iletkeninde indüklenen YEMD kaynaklı kısa süreli oluşan aşırı gerilim.

6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada YEMD, bir enerji tesisine veya enerji nakil hattına düşmesi ATP-EMTP programı sayesinde modellenip geçici (transient) analizi yapılmıştır. ATP-EMTP programında YEMD darbesi Heidler ve Rampa fonksiyonları

kullanılarak birden çok YEMD darbesi, güç sistemlerinde geçici (transient) olayların etkisini araştırmak için kullanılmıştır.

Bu çalışma ile elde edilen sonuçlarla, YEMD' in güç sistemleri için ne kadar tehlikeli olduğu ortaya çıkmıştır. YEMD' in enerji tesislerine veya enerji nakil hatlarına düşmesi sonucunda gerilim değerleri çok yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu yüksek gerilim değerleri güç sistemlerinin performansı için çok zararlıdır. YEMD, yüklerin, elektronik cihazların ve elektriksel teçhizatların aşırı gerilime maruz kalmasına sebep olur. Bu da yalıtım ve cihaz arızalarına neden olabilir. Bu sonuçlar, YEMD darbesine karşı korunma ihtiyacını ortaya koymaktadır. Parafudrlar, enerji tesisleri için YEMD' e karşı kullanılan en etkin koruma cihazlarından biridir. Senaryo II' de elde edilen sonuçlar, parafudrların güç sistemlerinde aktif olarak kullanılması sonucunda YEMD' in etkisini minimum seviyeye düşürdüğünü ve en etkin korumanın parafudrlar olduğunu ortaya koymaktadır.

Teşekkür: Bu çalışma Akdeniz Üniversitesi Araştırma Projeleri Yönetim Birimince Desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Beaty, H. W. Standard Handbook for Electrical Engineers. New York: McGraw-Hill Professional, 2006. ISBN 978-0071762328.
2. Ueda, T., and Dig., A Comparison between Two Tower Models for Lightning Surge Analysis of 77 kV System, IEEE Trans., 2000.
3. Burke, J. J. Power Distribution Engineering Fundamentals and applications. New York: CRC Press, 1994. ISBN 978-0824792374.
4. Shaida, N., Jamoshid, B.T., Lightning Simulation Study on Line Surge Arresters and Protection Design of Simple Structures, Degree Of Master Of Engineering Faculty of Electrical Eng. Univ. Tech., Malaysia, 2008.
5. Kawai, M., Studies of The Surge Response on a Transmission Line Tower, IEEE Trans, Pas-83, pp. 30- 34, 1964. Lastname, F. M., Book Title, Wiley-Interscience, New York, 1986.
6. Ferete, K., Nikolovski, S., Knezevic, G., Stojkov, M., Kovac, Z., Simulation of Lightning Transients on 110 kV overhead-cable Transmission Line Using ATP, EMTP, IEEE, 2010.
7. Çakıl T., Carlak H.F., Özen Ş. "The Analysis of Transient Phenomena on Power Transmission Lines Due to Lightning Electromagnetic Pulses", Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2017, St Petersburg, Russia, 22-25 May 2017.
8. Çakıl T., Carlak H.F., Özen Ş. "Protection Analysis of Surge Arresters and Isolators Against Over voltages Caused by Lightning Electromagnetic Pulses", International Conference on Advances and Innovations in Engineering, Elazığ, Turkey.
9. Greenwood, A. Electrical Transients in Power Systems. New York: John Wiley & Sons, 1991. ISBN 978 0471620587.
10. Uman, M. A. All about Lightning. Toronto: Dover Publications, 1986. ISBN 978-0486252377.
11. Leonid Grece, Modeling of Grounding Electrodes Under Lightning Currents, IEEE Trans. on Elec. Comp., Vol: 51, Issue 3, pp. 559 - 5712009.
12. Prikler, L. and H. K. Hoidalen. ATPDraw version 6.1 for Windows XP/7/8, 2017
<http://www.atpdraw.net/index.php>
Erişim tarihi: 2017.
13. Ishii, M., Vedig., Multistory Transmission Tower Model for Lightning Surge Analysis, IEEE Trans. on Power Del., vol. 6, No.3, pp. 1327-1335, 1991.
14. TEİAŞ, Türkiye Ulusal Elektrik Ağındaki Havai Hatların Trafoların ve Jeneratörlerin Elektrik'i Karakteristiği, Sistem Araştırma ve Kontrol Müdürlüğü.