



Demiryolu Elektrifikasyon Sistemlerinde Topraklama ve Temas Gerilimi

Mehmet TUTUCU*^{ID}, Nusret GÜZEL^{ID}

TCDD Genel Müdürlüğü, Demiryolu Yapım Dairesi Başk., Ankara, Türkiye

*mehmettutucu@tcdd.gov.tr

(Alınış/Received: 12.05.2021, Kabul/Accepted: 08.06.2021, Yayınlama/Published: 31.07.2021)

Öz: Elektrifikasyon sistemlerinde katener hattı (OCL) ve geri dönüş akımı devresi, AC cer akımı için akacak bir yol teşkil eder. Cer akımı, katener sistemi vasıtasıyla güzergâh üzerindeki elektrikli lokomotiflere aktarılır ve geri dönüş devresi yoluyla transformatör merkezine geri döner. Akım taşıyan raylar geri dönüş devresi için birincil iletkenidir. Raylar ve toprak arasındaki direnç sonlu ve raylar boylamsal bir dirence sahip olduğundan, dönüş akımının bir kısmı toprağa ve buradan da transformatör merkezine geri akacaktır. Transformatör merkezinin yakınlarında ise bu akım raylara ve transformatör merkezi topraklama sistemine geri döner.

Binlerce amper'e ulaşabilecek akım, geri dönüş devresi içerisinde akabilir ve işletme esnasında raylarda ve araçların iletken kısımlarında gerilime sebep olabilir. Yolcular ve çalışan personel tarafından köprülendiğinde, potansiyel olarak tehlikeli olabilecek gerilimleri önlemek için geri dönüş devresinin uygun bir şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu çalışmada bir yüksek hızlı tren elektrifikasyon sistemi için topraklama ve geri dönüş devresi tasarlanmış, temas gerilimi değerleri hem arıza hem de işletme koşulları için bilgisayar simülasyonu ile hesaplanmıştır. Geri dönüş devresinin farklı bağlantıları için elde edilen simülasyon sonuçları çalışma içerisinde gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektrifikasyon, Cer Akımı, Topraklama, Temas Gerilimi

Earthing and Touch Voltage in Railway Electrification Systems

Abstract: The overhead contact line system (OCL) and the return circuit form the traction current circuit of electrified railways. The traction current flows via the contact line system to the electric locomotives and via the return circuit back to the substation. The running rails serve as the primary conductors for the return current. As the resistance between the rails and earth is finite and the rails have a longitudinal resistance, a portion of the return current will flow to earth and back to the substation through earth. Near the substation, this current flows back into the running rails and into the substation earthing system.

Up to several thousand amperes can flow in the return circuit and cause voltages at the running rails and conductive parts of vehicles during operation. To avoid voltages which could be potentially dangerous when bridged by passengers and staff, the return circuits need to be adequately designed. In this study, an earthing and return current circuit were designed for a high-speed train electrification system and the touch voltage values for both operation and fault condition was calculated via a computer simulation. Simulation results of return circuit that have alternative connections are shown in this study.

Keywords: Electrification, Traction Current, Earthing, Touch Voltage

1. Giriş

Demiryolu elektrifikasyon sistemi trenlerin ihtiyaç duyduğu enerjiyi temin edilebilmek için güzergâh boyunca tesis edilen güç sistemleri ile katener hatlarından oluşur. Katener sistemleri, tasarım için temel standart olan TS EN 50119'da belirtildiği şekliyle, sadece trafo merkezi gibi sabit tesislerden demiryolu araçlarına enerji aktarmak için değil ayrıca rejeneratif enerjinin trafo merkezlerine aktarılması için tasarlanır [1]. Bu çalışmada referans alınan katener sistemi [1]'in

Atıf için/Cite as: M. Tutucu, N. Güzel, "Demiryolu elektrifikasyon sistemlerinde topraklama ve temas gerilimi" *Demiryolu Mühendisliği*, no. 14, pp. 122-129, July 2021. doi: 10.47072/demiryolu.936613

kriterlerine göre tasarlanmış bir sistem olup simülasyon parametreleri, buna göre seçilmiştir. Cer gücü sistemleri için mevcutta kullanılan ve gelecekte kullanılması ön görülen sistemler [2]'de verilmiştir. Türkiye'de kullanılan ve [2]'de konvansiyonel besleme kategorisinde değerlendirilen klasik besleme sistemine göre simülasyon gerçekleştirilmiştir.

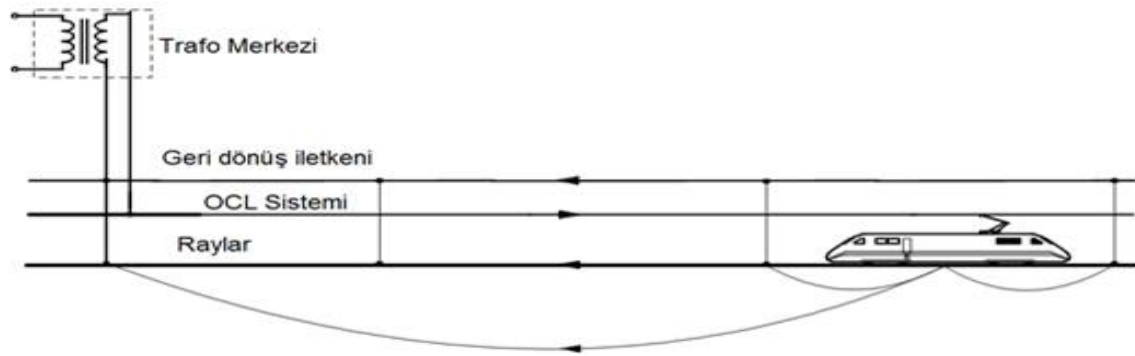
1.1. Klasik besleme sistemi

Demiryolu elektrifikasyon sistemleri besleme sistemi yönünden çeşitlilik göstermektedir. Genel olarak besleme gerilimi seviyesi açısından DC (1,5 kV ve 3 kV) ve AC (15 kV, 16,7 Hz; 25 kV, 50 Hz) olarak ayrılmaktadır. DC ve 50 Hz'lik AC sistemler ulusal güç şebekelerinden beslenirken, AC 16,7 Hz sistemler ise demiryoluna özel tek fazlı üretim ve iletim şebekelerinden beslenmektedir. Ülkemizde konvansiyonel ve hızlı ana hat demiryolu elektrifikasyon sistemleri 154 kV ulusal güç sisteminden aldığı enerjiyi 25 kV 50 Hz gerilim seviyesine dönüştürerek kullanmaktadır. Tüm bu gerilim seviyeleri için EN 50163 standardında işletme koşullarındaki sınır değerler belirlenmiştir. [3]

Tablo 1. EN 50163' e göre nominal gerilim seviyeleri ve izin verilen sınır değerler

Sistemi Gerilimi	U_{min2} V	U_{min1} V	U_n V	U_{max1} V	U_{max2} V	U_{max3} V
DC 600 V		400	600	720	800	-
DC 750 V		500	750	900	1,000	1,270
DC 1,5 kV		1,000	1,500	1,800	1,950	2,540
DC 3,0 kV		2,000	3,000	3,600	3,900	5,075
AC 15 kV 16,7 Hz	11,000	12,000	15,000	17,250	18,000	24,300
AC 25 kV 50 Hz	17,500	19,000	25,000	27,500	29,000	38,750

Ülkemizde kullanılan ve bu çalışmada ele alınacak olan klasik besleme sistemi, 154 kV gerilimi 25 kV gerilime indiren bir transformator merkezi, OCL ve geri dönüş devresinden oluşur. OCL sistemi seyir teli, portör teli, pandül vs. iletkenlerden oluşmaktadır. Burada seyir teli ve portör teli ile taşınan akım, geri dönüş iletkeni, raylar ve toprak vasıtasıyla ile kaynağa yani transformator merkezine geri döner.



Şekil 1. Klasik besleme sistemi

Raylar elektriksel açıdan demiryolu sisteminin önemli bir elemanıdır. İlk olarak güç devresiyle sinyal devresi, ikinci olarak da güç devresiyle referans toprak arasında bir ara yüz oluşturur. Geri dönüş akımı, demiryolu araçlarının tekerlerinden akarak iki ray, toprak ve geri dönüş iletkeni arasında bölünür.

1.2. Geri dönüş sistemi

Bir demiryolu güç sisteminin elektriksel davranışının tam doğrulukla analiz edilmesi sistemin elektriksel parametreleri olmadan mümkün değildir. Bazı parametreler bilinen formüller [4] ile yüksek doğrulukta hesaplanırken diğer kritik parametreler (toprağın elektriksel karakteristiği, toprak ve ray arasındaki iletkenlik veya raylar arasındaki kapasitans değeri) ise deney ve ölçümlerle doğrulanabilir [5].

Demiryolu hattı ve toprak arasındaki galvanik kuplaj neticesinde meydana gelen bu direnç, üstyapı bileşenleri ile toprağın özelliklerine göre farklı değerler gösterebilir. Traversler, bağlantı parçaları, balast, subbalast, beton yol ve atmosferik koşullara bağlıdır. Yapılan ölçümler neticesinde ray-toprak geçiş direncinin karakteristik değeri 0,05 – 2,5 Ω .km arasında değiştiği görülmüştür. Bu değer kompleks vektöriyel bir büyüklük olmasına rağmen faz açısı 1^0 ile 3^0 arasında değiştiğinden omik olarak dikkate alınmaktadır. Ayrıca katener iletkenlerini taşıyan direkler ve belirli aralıklarla demiryolu hattına paralel olarak toprağa gömülen toprak elektrotları da efektif iletkenliğe katkı sağlamaktadır. [4]

1.3. Temas gerilimi

Her yüksek gerilim tesisinde olduğu gibi demiryolu güç sisteminde de aşırı gerilimlere karşı canlıları koruma, yüksek önceliğe sahiptir. Canlılar tarafından erişilebilir alanlarda normal işletme şartlarında aşırı gerilim oluşmaması ve katener sistemindeki herhangi bir arıza durumunda arızanın kısa sürede temizlenerek oluşacak temas geriliminin sınırlandırılması esas olarak alınmaktadır. İşletme ve arıza durumlarında meydana gelecek efektif temas gerilimleri ($U_{te\ max}$) EN 50122-1 standardında [6] belirtilen sınır gerilim değerlerini geçmeyecek şekilde, standardın 9.2.2.4. maddesinde belirtilen akış şemasına uygun olarak topraklama sistemi tasarlanmalıdır.

Tablo 2. EN 50122-1' e göre zamana bağlı bazı maksimum efektif temas gerilimi değerleri

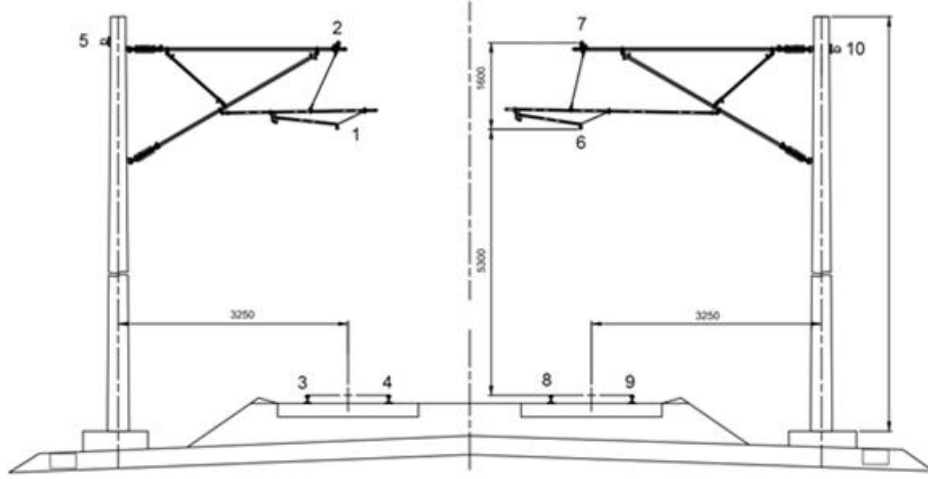
t (s)	$U_{te\ max}$	
	Uzun süreli (V)	Kısa süreli (V)
>300	60	
300	65	
1	75	
0,7	90	
<0,7		155
0,6		180
0,5		220
0,2		645
0,1		785
0,02		865

2. Metot

Cer akımından kaynaklı geri dönüş sisteminde meydana gelen gerilimlerin tespitinde katener hattına ve geri dönüş sistemine ait parametreler sistem modeli içerisinde kullanılmıştır. Tüm iletkenlerin geometrik konumları dikkate alınarak karşılıklı endüktansları dahil olmak üzere sistem empedansı ve geri dönüş sisteminin önemli bir parametresi olan toprağın etkisi hesaba dahil edilmiştir. Bu parametrelere dayanılarak ilk önce sisteme ait matematiksel model ardından ise elektriksel model oluşturulmuştur.

2.1. Matematiksel model

Sistemin analizi için, katener hattı çoklu iletim sistemi (MTL) olarak ele alınmaktadır. R (direnç) ve L (endüktans) matrisleri Carson' un [5] eşitliklerine göre tespit edilecektir. Empedans, reel ve imajiner olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. R, reel kısmı ifade ederken X, empedansın reaktif bileşenidir. MTL, genelde iletim hat modellenmesi için kullanılsa da literatürde demiryolu uygulamaları için de başarılı uygulamaları bulunmaktadır. Bir demiryolu sistemine ait elektriksel parametrelerin tespiti [7]' de verilmiştir.



Şekil 2. Demiryolu hattı (yüksek hızlı demiryolu) kesit görünüşü

1,6 seyir teli, 2,7 portör teli, 5,10 geri dönüş iletkeni, 3, 4, 8, 9 rayları sembolize etmektedir. Herhangi bir katener sistemi Şekil 2'de gösterildiği gibi n-iletkenli bir sistem olarak gösterilebilir. Klasik besleme cer sistemi için toplam on adet iletken, empedans matrisine dâhil edilir. İletkenlerin birim uzunluktaki direnç değerleri;

$$R'_c = R/l = \rho/A = 1/(\kappa \cdot A) \quad \Omega/km \quad (1)$$

AC sistem için ise toprak, bir dirence sahiptir ve geri dönüş sistemi üzerindeki toprak direnci R'_E güç kaynağının frekansı ile değişkenlik gösterecektir.

$$R'_E = \left(\frac{\pi}{4}\right) \mu_0 \cdot \mu_r \cdot f \quad \Omega/km \quad (2)$$

İletken – toprak çevriminin self empedansı direnç, self – endüktans ve dış endüktans oluşur. i iletkeninin self – empedansı aşağıdaki şekliyle ifade edilir.

$$Z'_{ii} = R' + R'_E + j(X'_{ex} + X'_{in}) \quad \Omega/km \quad (i=1,2...10) \quad (3)$$

Kullanılan rayların büyük kesitlerinden dolayı raylar için deri etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Rayların iç endüktansın, deri etkisinin frekansı ile artmasından ve çeliğin frekansa bağlı geçirgenliğinden dolayı aşağıda verilen formüller ile hesaplanması tavsiye edilmemektedir. Bu çalışmada ray empedansı olarak $0,2+j0,2 \quad \Omega/km$ değeri hesaplamalarda kullanılacaktır [1].

X'_{ex} dış, X'_{in} iletkenin iç reaktansı olup;

$$X'_{ex} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L'_{ex} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot f \cdot \ln(\delta_E/r) \quad \Omega/km \quad (4)$$

$$X'_{in} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L'_{in} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot f \cdot \ln(r/r_{eq}) \quad \Omega/km \quad (5)$$

Burada L'_{ex} dış endüktans, δ_E topraktaki akımın nüfuz derinliği, r iletkenin yarıçapı, L'_{in} iç endüktans, r_{eq} eş değer yarıçaptır. Toprak içinde akan akımın nüfuz derinliği ise;

$$\delta_E = 0,738 \cdot \sqrt{f \cdot \mu_0 / \rho_E} \quad m \quad (6)$$

ifadesi ile gösterilir. İki iletken toprak çevrimi i ve k' nın kuplaj empedansı;

$$Z_{ik} = R'_E + jX'_{ik} \quad \Omega/km \quad (7)$$

$$X'_{ik} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot f \cdot \ln(\delta_E/a_{ik}) \quad \Omega/km \quad (8)$$

bağıntılarıyla verilip, a_{ik} burada iletkenler arası mesafedir. Tüm hesaplamalar neticesinde 10 iletkenli bir demiryolu sistemi için 10x10 boyutunda bir empedans matrisi oluşur.

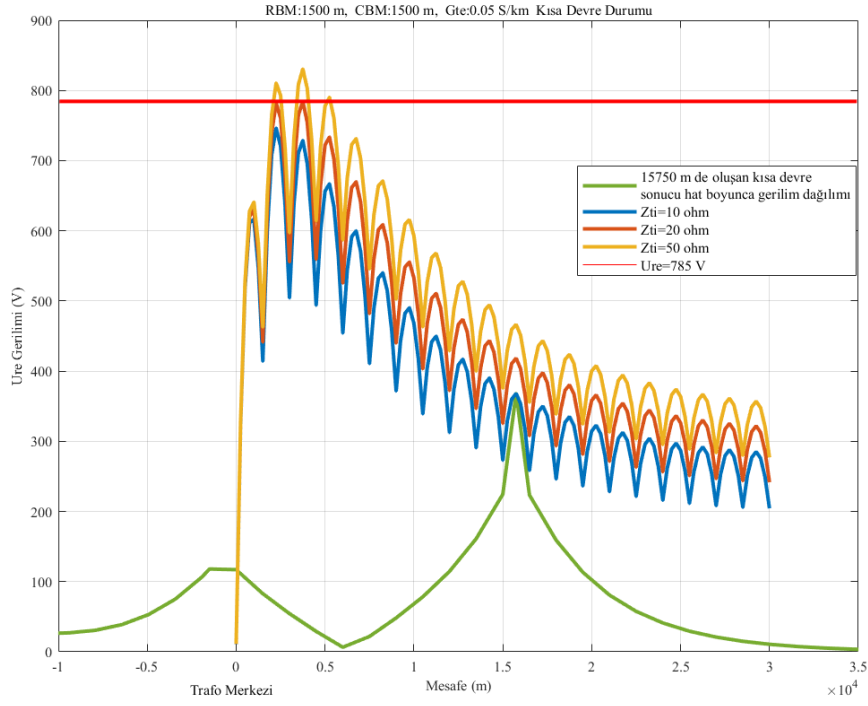
2.2. Elektriksel model

Sistemin elektriksel modelinde transformatör merkezi, bir akım kaynağı ve bu kaynağa paralel bağlı bir kaynak empedansı ve transformatör merkezinin topraklama direnci olarak modellenmiştir. Sistem üzerinde geri dönüş iletkenleri demiryolu hattı üzerinde belirli aralıklar ile birbirine irtibatlandırılmıştır ve ray bağlantıları gerçekleştirilmiştir. Bu noktalarda geri dönüş iletkenlerine bağlanmış topraklama elektrotları vasıtasıyla geri dönüş sistemi toprak irtibatı gerçekleştirilmektedir. Ayrıca temas geriliminin işletme şartlarında en yüksek olabileceği durumu modellemek amacıyla OCL sistemi hat sonunda paralellenmiş ve dolayısıyla hat empedansı düşürülerek maksimum akımların akması sağlanmıştır. Model içerisinde gümüş alaşımli bakır 120 mm² seyir teli (CuAg0,1), magnezyum alaşımli bakır 65 mm² portör teli (BzII 70) ve geri dönüş iletkeni de 176,9 mm² çelik özlü alüminyum (ostrich) iletken kullanılmıştır.

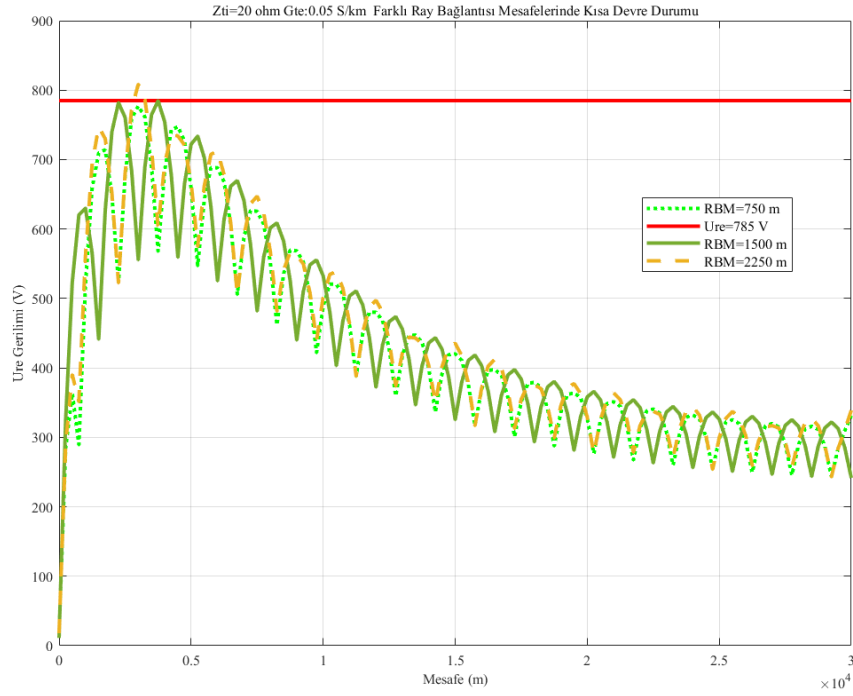
3. Bulgular

Yapılan simülasyonda yük ve kısa devre durumları için toprak özgül direncinin 260 ohm.m olduğu varsayılmıştır. Kısa devre analizinde 20 kA kısa devre akımı, yük analizinde 25 MVA %12 Uk değerine sahip trafo merkezi ve güç faktörü 0,95 olan 8 MW gücünde tren kullanılmıştır. Trafo merkezi topraklama ağının toprak geçiş direnci 0,5 Ω olarak alınmış olup elde edilen sonuçlara ait grafikler aşağıda gösterilmiştir.

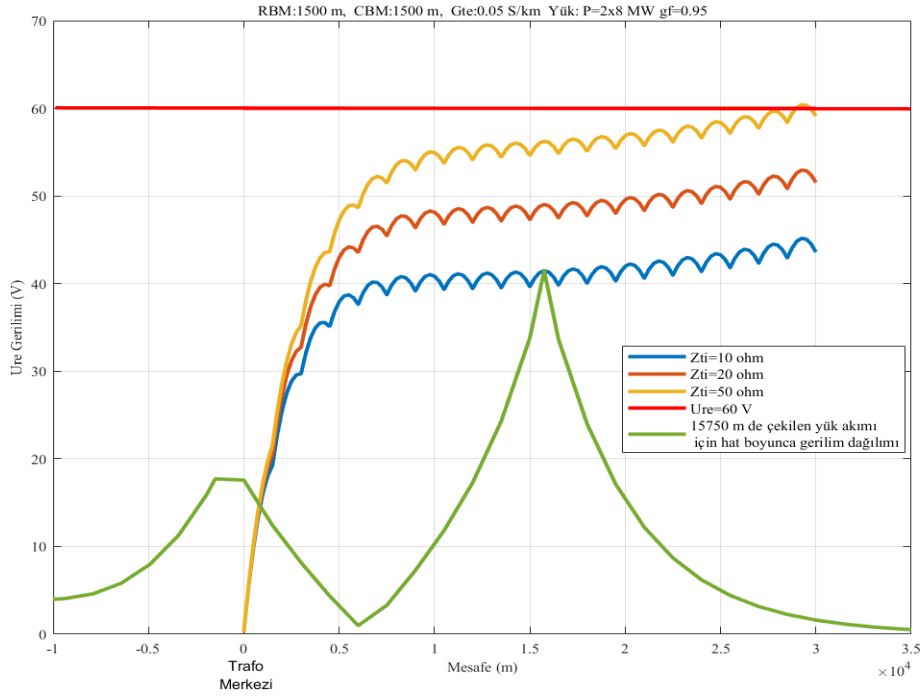
Elektrifikasyon sistemlerinde meydana gelen arızalarda trafo merkezi fider kesicilerinin ani açma süresi EN 50388 standardına göre 80 ms olarak tanımlanmıştır. Yapılan analizde bu değer ekstra güvenliğin sağlanması açısından 100 ms olarak kabul edilmiş, bu değere karşılık gelen temas gerilimi sınır değeri Tablo 2.'ye göre 785 V olarak alınmıştır. Sürekli akımın çekildiği yük durumunda ise yine aynı tabloda verildiği şekliyle 60 V temas gerilimi değeri referans alınmış olup analizde, bu değerlere göre karşılaştırma yapılmış ve ayrı grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 3. Kısa devre durumunda farklı topraklama direnç değerlerine göre ray potansiyelleri



Şekil 4. Kısa devre durumunda farklı ray bağlantı mesafelerine göre ray potansiyelleri



Şekil 5. Yük durumunda farklı topraklama direnç değerlerine göre ray potansiyeli ve bir noktadaki yükün demiryolu hattı boyunca meydana getirdiği potansiyel değerleri

RBM: Geri dönüş iletkeni ile ray arası bağlantı mesafesi

CBM: İki hattın geri dönüş iletkenleri arası çapraz bağlantı mesafesi

4. Sonuç

Cer akımlarından kaynaklı oluşan temas gerilimi ile ray potansiyeli arasındaki ilişki [6]'da verilmiştir. Yapılan simülasyonla en kötü şart olan ve temas geriliminden daha büyük olan ray potansiyeli değeri belirlenen bir güzergah uzunluğu için hesaplanmıştır. Şekil 3. ve Şekil 4.'de OCL'de meydana gelen bir kısa devre sonucu oluşabilecek ray potansiyeli değerleri verilmiş olup görüleceği üzere trafo merkezinden ilk 5 km içinde ray potansiyeli en büyük değerini almaktadır. Şekil 6.'da ise 2x8 MW'lık bir yük değerine karşılık gelen ray potansiyel değerleri hesaplanmıştır. Ray potansiyeli, 50 ohm topraklama istasyonu direnç değeri için kısa devre durumunda trafo merkezine yakın kesimde, yük durumunda ise nötr bölgeye yakın kesimlerde sınır değeri aşmaktadır. Sistem için oluşturulan modelde 750 m, 1500 m, 2250 m ray bağlantıları ile yapılan incelemede daha kısa aralıklarla yapılan bağlantının ray potansiyelini düşürdüğü ancak çok az farklılık gösterdiği görülmektedir.

İşletme koşullarında demiryolu üstyapısında gerçekleştirilen tamiratlardan dolayı yukarıda bahsi geçen bağlantıların sökülmesinin gerekmesi ve sinyal ray devreleri tarafından geri dönüş sisteminin bir parçası olan raylarda meydana gelebilecek kırıklığın sezilmesinin geri dönüş sistemi iletkenleri tarafından engellenmesi, kısa aralıklarla ray bağlantılarının yapılmasını sınırlayan durumlardır. Bu çalışma çift hatlı demiryoluna göre yapılmıştır. Özellikle konvansiyonel hatlar gibi tek hat demiryolunda kısa aralıklarla bağlantıların yapılması zaruri olabilecek, bu sebeple bağlantı aralıklarının belirlenmesinde tek hat için de ayrı bir analiz yapılması gerekmektedir.

Kaynakça

- [1] TS EN 50119 Railway applications – Fixed installations – Electric traction overhead contact lines
- [2] D. Serrano-Jiménez, L. Abrahamsson, S. Castaño-Solis, J. Sanz-Feito “Electrical railway power supply systems: Current situation and future trends”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 92, 181–192. doi:10.1016/j.ijepes.2017.05.008.
- [3] TS EN 50163 – Nisan 2013 Demiryolu Uygulamaları – Cer Sistemlerinin Besleme Gerilimleri Railway Applications-Supply voltages of traction systems.
- [4] F. Kiessling, R. Puschman, A. Schmieder, Schneider E., “Contact Line for Electric Railways, Planning Design Implementation Maintenance, 2018”.
- [5] J. R. Carson, “Wave propagation in overhead wires with ground return,” *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 5, pp. 539–554, Oct. 1926.
- [6] TS EN 50122 – 1 Demiryolu uygulamaları- Sabit tesisler - Elektriksel güvenlik, topraklama ve dönüş devresi- Bölüm 1: Elektrik çarpmasına karşı koruma önlemleri
- [7] A. Mariscotti, P. Pozzobon, “Determination of the electrical parameters of railway traction lines: calculation, measurement, and reference data”, *IEEE Transactions On Power Delivery*, vol. 19, no. 4, October 2004

Özgeçmiş**Nusret GÜZEL**

1980 tarihinde Erzincan’da doğmuştur. Lisans ve yüksek lisans eğitimini Sakarya Üniversitesinde tamamlamıştır. TCDD Genel Müdürlüğü Demiryolu Yapım Dairesinde çalışmaktadır. İlgili alanına giren araştırma konuları demiryolu elektrifikasyonu, katener sistemleri, cer trafo merkezleri, SCADA sistemleri ve tünel elektromekanik sistemleridir.

E-Posta: nusretguzel@tcdd.gov.tr

**Mehmet TUTUCU**

1981 tarihinde Karabük’ te doğmuştur. Lisans ve yüksek lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesinde tamamlamıştır. TCDD Genel Müdürlüğü Demiryolu Yapım Dairesinde çalışmaktadır. İlgili alanına giren araştırma konuları demiryolu elektrifikasyonu, katener sistemleri, cer trafo merkezleri, SCADA sistemleri ve tünel elektromekanik sistemleridir.

E-Posta: mehmettutucu@tcdd.gov.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Tüm yazarların eşit oranda katkısı olmuştur.