

## Analysis of Busbar Distribution Systems as Data Transmission Line

Zeynep HASIRCI\*<sup>1</sup>, Ismail Hakki CAVDAR <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Electronics and Communication Engineering, Of Technology of Faculty, Karadeniz Technical University, 61830, Trabzon, Turkey

<sup>2</sup> Electrical and Electronics Engineering, Engineering Faculty, Karadeniz Technical University, 61080, Trabzon, Turkey

( Received: 24.05.2018, Accepted: 12.06.2018, Published Online: 30.06.2018)

### Keywords

Smart grid  
Busbar  
Broadband PLC  
Transmission line

**Abstract:** Smart grid aims a network infrastructure managing and controlling processes from energy generation to final consumption. Thus, effective use of information and communication technologies in this field is essential. Since the low-voltage network is an endpoint that met with consumers, it has a great importance in the intelligent network architecture. As busbar energy distribution system is an important part of the modern power distribution grid, it needs to be analyzed in terms of power line communications. In this study, the busbar distribution system was analyzed as a transmission line and examined as a broadband data transmission medium. Using the measured S-parameters, the primary and secondary transmission line parameters for busbars at different current levels are obtained.

## Busbar Dağıtım Sistemlerinin Veri İletim Hattı Olarak Analizi

### Anahtar Kelimeler

Akıllı şebeke  
Busbar  
Geniş bant PLC  
İletim hattı

**Özet:** Akıllı şebeke, enerjinin üretiminden son tüketiciye ulaşmasına kadar olan süreçlerin kontrol edilebildiği ve yönetilebildiği bir şebeke alt yapısı hedeflemektedir. Bu nedenle bilgi ve iletişim teknolojilerinin bu alanda etkin kullanımı büyük önem taşır. Alçak gerilim şebekesi ise tüketiciyle buluşulan son nokta olmasından dolayı akıllı şebeke mimarisinde büyük öneme sahiptir. Busbar enerji dağıtım sistemleri modern güç dağıtım şebekesinin önemli bir parçası olup, enerji hatları üzerinden haberleşme söz konusu olduğunda irdelenmesi gereken bir yapı olarak karşımıza çıkar. Bu çalışmada, busbar dağıtım sistemi iletim hattı olarak analiz edilmiş ve geniş bant veri iletim ortamı olarak incelenmiştir. Ölçülen S-parametreleri kullanılarak farklı akım kademelerindeki busbarlar için birincil ve ikincil iletim hattı parametreleri elde edilmiştir.

### 1. Giriş

Akıllı şebeke, tüm dünyada son yıllarda önemli bir araştırma konusu olmakta ve her geçen gün de önem kazanmaya devam etmektedir. Alçak gerilim şebekesinin tüketiciye ulaşan son nokta olması, enerji hatları üzerinden haberleşme (*power line communication*, PLC) teknolojilerinin geliştirilmesinde odak noktası olmasına neden olmuştur. Şebekeyi akıllı hale getirmek için, şebekedeki her yapının veri iletimi için uygunluğunun araştırılması ve sorunlarının ortaya konulması gerekmektedir. Dağıtım şebekesi en temel anlamda enerji iletimi amaçlı kurgulandığından, enerji dağıtım altyapısı (kablolar, busbarlar, transformatörler vb.), düşük frekanstaki yüksek genlikli şebeke sinyalinin iletilmesi için elverişli bir yapı çizmektedir. İletişim olanakları açısından incelendiğinde, yüksek frekanslı ve düşük genlikli

işaretler için davranışının tüm dağıtım alt yapısı için araştırılması gerekir. Genel anlamda enerji hatları, iletişimin amaçlandığı yüksek frekanslarda değişen bir hat empedansına, yüksek zayıflama etkisine ve kayda değer bir gürültü etkisine sahip bir kanal karakteristiği gösterirler. İlâveten, herhangi bir ortamda veri iletişimi yapabilmek için, iletişim yapılacak kanalın özelliklerinin bilinmesi elzemdir. Bunlar genel olarak giriş empedansı, sinyal zayıflaması, faz bozunumu ve gürültü olarak sıralanabilir.

Bu çalışmada, birçok üstünlüğünden ötürü özellikle yüksek güç tüketen endüstriyel alanlarda bina içinde elektrik enerjisini taşımada kullanılan, modüler yapıya sahip busbar enerji dağıtım sistemlerinin geniş bant davranışları incelenmiştir. Gerek fiziksel yapı farklılığı gerekse projelendirilme farklılığı nedeniyle, kablolar üzerinde yapılan PLC

araştırmalarının busbarların PLC olanaklarını tam ve doğru olarak tanımlamayacağı bir gerçektir. Akıllı şebeke haberleşme mimarisinde bütünlüğü sağlama ve tüm alçak gerilim şebekesinde tümleşik bir haberleşme alt yapısı oluşturma hedefi için, şebekedeki her yapı gibi busbar dağıtım hatlarının da özelliklerinin bilinmesi önemli bir husustur. Bu nedenle, alçak gerilim şebekesinin özellikle endüstriyel sahalarda önemli bir kısmını oluşturan busbarların da PLC iletişim kanalı açısından yüksek frekanslarda (geniş bant) kanal özelliklerinin irdelenmesi, akıllı şebekede hedeflenen ulaşmada önemli bir katkı olacaktır.

## 2. Materyal ve Yöntem

Kompakt ve modüler yapıda olan busbar enerji dağıtım sistemleri, fabrikalarda üretim alanları ve ana enerji merkezleri, otomotiv tesisleri, otomotiv yan sanayisi, tekstil sektörü, fuar alanları, yüksek katlı binalar, gökdelenler, oteller, hastaneler, iş merkezleri, büyük alışveriş merkezleri, demir çelik tesisleri, tersaneler, enerji santralleri gibi yerlerde tercihen kullanılmaktadır.

Busbar dağıtım sistemi, 1930'lu yıllarda, temel olarak yüksek katlı binaların ve fabrikalarda değişen üretim teknolojilerinin bir ihtiyacı olarak, Amerika'da ortaya çıkmıştır. 1950'li yıllarda Avrupa ve Japonya'da kullanılmaya başlanmıştır. Türkiye de ise 1970'li yıllarda üretimine başlanmış olup yaygın şekilde kullanılmaktadır. Sac veya alüminyum gövde içerisinde, izole edilmiş baralar vasıtası ile dağıtılan enerjiyi; özel çıkış üniteleri ile istenilen noktalardan, güvenli bir şekilde, enerjiyi kesmeden almak mümkün olmaktadır. Busbarlar, istenildiği anda uzatılabilme, değiştirilebilme, taşınabilme ve tekrar kullanılabilme özelliklerine sahiptir. Busbar boyunca istenilen noktalardan çıkış kutuları ile enerji almak; son derece kolay, ekonomik ve emniyetlidir. Şekil 'de kompakt bir busbar sistemi yapısı görülmektedir [1].



**Şekil 1.** Busbar dağıtım hattı (3 m'lik birim boy)[1]

Busbar dağıtım hatları, 3-fazlı bir iletim yolu olup en genel manada 3 tane faz iletkeni ve 1 adet nötr iletkeninden oluşur. İletkenler, hibrit izolasyonlu olup (Mylar polyester film + epoksi) alüminyum gövde içine sıkıştırılarak yerleştirilmiştir [1]. Ayrıca kompakt yapıda iletkenler ve gövde arasında hava boşluğu olmadığı için iletkenlerde oluşan ısı, alüminyum gövde aracılığıyla ortama kolayca transfer edilebilir.

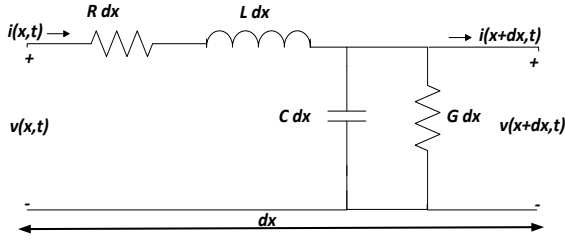
Busbar sistemleri ile ilgili literatürdeki çalışmalar, daha çok akla gelen ilk uygulaması olan enerjinin iletimi ile ilgili araştırmalardır. [2]' de busbarın sistem empedansı şebeke frekansında (50 / 60 Hz) analitik olarak hesaplanmaya çalışılmış ve bu hesaplar yapılan deneyler ile desteklenmiştir. [3]' te çok iletkenli busbar sisteminin kararlı durum analizi için önerilen model deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. [4]' te iletkenler üzerinden geçen akım hesabı 50 Hz'de yapılmış ve gerçek ölçümlerle bu hesaplamalar doğrulanmıştır. [5]' te ise 300 kHz bandında, *Cauer* ağ modelinin, busbar analizi için bir uygulaması verilmiştir. Elektrik dağıtım şebekesinin önemli bir parçasını oluşturan busbar sistemlerinin, PLC kanalı olarak analizi literatürde henüz çok yer almamıştır. [6] ve [7] çalışmalarında ise busbarın bir iletim hattı olarak kullanılması önerilmiş ve literatüre kazandırılmıştır. Ancak, bir PLC kanalı olarak busbarın incelenmesi ve literatüre daha çok araştırmanın kazandırılması, genelleştirilmiş bir akıllı şebeke alt yapısı için önemli bir amaç olacaktır.

Alüminyum iletkenli kompakt yapıdaki busbarlar bakır iletkenli olanlara göre maliyet açısından daha uygun olup daha yaygın kullanım alanına sahiptirler. Bu sebeple, bu çalışmada bakır iletkenli busbarlardan ziyade alüminyum iletkenli busbarlar üzerine yoğunlaşmıştır. 3 m'lik birim boya sahip E-LINE KX serisi kompakt busbar dağıtım sistemi Şekil 'deki gibi olup, ölçümler ve hesaplamalar bu birim boydaki busbarlar üzerinden yapılmıştır [6-8].

Busbar dağıtım sistemi bir iletim hattı olarak modellenirken çok iletkenli iletim hattı analizi yerine iki iletkenli iletim hattı analizi tercih edilmiştir. 3-fazlı bir sistemde eğer tek faz veri iletişimi için kullanılacaksa buradaki modellemede ve ölçümlerde iki iletkenli analiz tercih edilebilir [9, 10]. İki iletkenli analiz uygulanırken, veri aktarımında, sinyalleşme için kullanılan iletkenler dışında kalan iletkenler arası çapraz girişim (*crosstalk*) ihmal edilir. İki iletkenli model çok iletkenli olandan daha pratik olup, elektromanyetik dalganın iletkendeki yayılım hızı, kablunun karakteristik empedansı ve sinyal zayıflaması gibi önemli çıktıları yüksek doğrulukta modelleyebilmeyi olanaklı kılar. Burada farklı akım kademelerindeki busbarların (630 A, 1250 A ve 2000 A) L2-N sinyal iletim yolu için 1-50 MHz bandında S-parametreleri ölçümleri gerçekleştirilmiş ve iki iletkenli hat modeli ile busbarların birincil ve ikincil hat parametreleri hesaplanmıştır.

İki iletkenli iletim hattı modeli, her biri iletim hattının  $dx$  diferansiyel uzunluklu bir parçasını temsil eden sonsuz sayıda iki kapılılar serisi olarak tanımlanır. Yani iletim hattı modeli, Şekil 'de gösterilen birim yapının sonsuz tanesinin yan yana gelmesiyle oluştuğundan, eleman boyutları birim uzunluk başına ( $dx$ ) tanımlanmıştır. Dolayısıyla her biri, birim uzunluk başına RLCG parametreleriyle temsil edilir ve Şekil 'de verildiği gibi  $Rdx$ ,  $Ldx$ ,  $Cdx$  ve  $Gdx$  şeklinde

gösterilir. Bu parametreler bazı kaynaklarda, birincil hat sabitleri olarak da nitelendirilir ve bu parametreler ile iletim hattının transfer fonksiyonu elde edilebilir [11].



Şekil 2. Bir iletim hattının birim uzunlukta parçasına ( $dx$ ) ait şematik gösterim

Birincil hat sabitleri ya da RLGC parametreleri;  $Rdx$ , iletkenlerin dağılmış direncini simgeleyen seri bir direnç elemanı,  $Ldx$ , iletkenler etrafındaki dağılmış endüktansı simgeleyen seri bir endüktans,  $Cdx$ , iki iletken arasındaki kapasiteyi simgeleyen bir kondansatör,  $Gdx$ , iki iletkeni ayıran yalıtkan malzemenin iletkenliğini simgeleyen iletkenlik elemanı şeklindedir. Burada  $v(x,t)$ ,  $v(x+dx,t)$ ,  $i(x,t)$  ve  $i(x+dx,t)$  ise hattın  $x$  ve  $x+dx$  noktalarındaki anlık (ani) gerilim ve akım değerleridir. İletim hattındaki transfer fonksiyonunu bulmak için, gerilim ve akım ifadelerine ihtiyaç vardır. Telgrafçılar denklemleri (ya da telgraf denklemleri) diye adlandırılan ve (1) ve (2)'deki gibi verilen denklem takımları, iletim hattındaki gerilim ve akımı tanımlayan bir lineer diferansiyel denklem çiftidir. Bu bağıntılar Maxwell denklemlerine dayanır.

$$\begin{aligned} -\frac{v(x+dx,t)-v(x,t)}{dx} &= Ri(x,t) + L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \\ -\frac{i(x+dx,t)-i(x,t)}{dx} &= Gv(x,t) + C \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} -\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} &= Ri(x,t) + L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} &= Gi(x,t) + C \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

Bir hattın birincil hat sabitleri yani RLGC parametreleri biliniyorsa bu hattın yayılma sabiti ( $\gamma$ ) ve karakteristik empedansı ( $Z_c$ ) bulunabilir.

Hattın yayılma sabiti ( $\gamma$ ), (3)'teki gibi bulunur.

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (3)$$

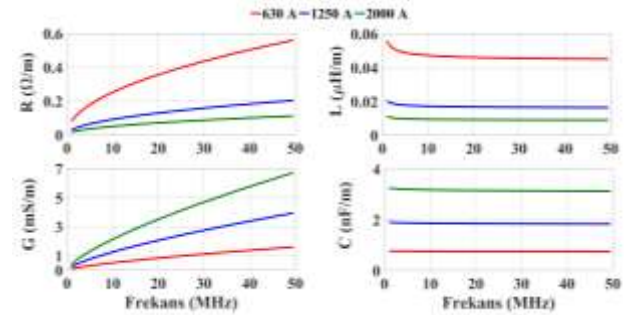
Karakteristik empedansı ( $Z_c$ ) ise (4)'teki gibi bulunur.

$$Z_c = \frac{V_0^+}{I_0^+} = \frac{R + j\omega L}{\gamma} = \frac{\gamma}{G + j\omega C} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (4)$$

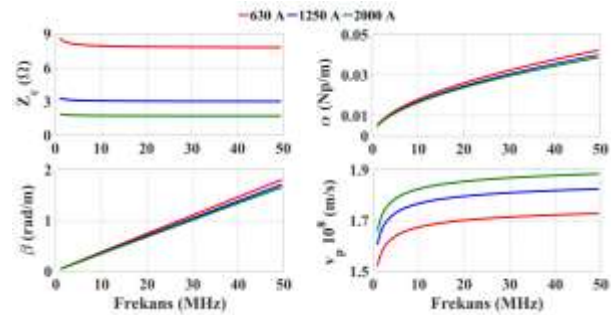
$\gamma$ , metre başına değişimin bir ölçüsü olmasının yanı sıra boyutsuz bir niceliktir ve  $\gamma = \alpha + j\beta$  şeklinde karmaşık bir değerdir. Burada,  $\alpha$ , zayıflama sabiti (Np/m),  $\beta$  ise faz sabiti (rad/m) olarak adlandırılır.

### 3. Bulgular

Farklı akım kademelerindeki busbar dağıtım sistemlerinden (630 A, 1250 A ve 2000 A) ölçülen S-parametreleri ile L2-N sinyal iletim yolu için hesaplanan RLGC değerleri için **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** te verilmiş olup bu parametreler kullanılarak (3) ve (4)'ten hesaplanan  $Z_c$ ,  $\alpha$  ve  $\beta$  iletim hattı parametrelerinin değişimi ise **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** te gösterilmiştir. Burada verilen  $v_p$  (m/s) faz hızı ya da yayılım hızı olup  $v_p \approx 1/\sqrt{LC}$  ile hesaplanır.



Şekil 3. 630 A, 1250 A ve 2000 A'lik busbarlar için L2-N sinyal yolunda hesaplanan RLGC değerleri



Şekil 4. 630 A, 1250 A ve 2000 A'lik busbarlar için L2-N sinyal yolunda hesaplanan  $Z_c$ ,  $\alpha$  ve  $\beta$  değerleri

### 4. Tartışma ve Sonuç

Akıllı şebeke ile bütünleşen PLC iletişimde, iletişim kanalı olarak busbarların akıllı şebeke mimarisinde geniş bant veri iletim olanaklarının incelenmesi ve ortaya çıkacak kanal davranışına uygun haberleşme performanslarının araştırılması önemli bir konudur. Bu sebeple oluşturulacak olan kanal modelinde iletim hattı olarak kullanılacak busbarın hat parametrelerinin doğru olarak belirlenmesi gerekir. Bu amaç doğrultusunda yapılan bu çalışmada, busbar dağıtım sistemi bir iletim hattı olarak modellenmiştir.

Kavramsal olarak basit ve analitik olarak kullanışlı olan S- parametreleri, devre ya da yapı hakkında iyi bir öngörü sağladığından, S-parametrelerine dayalı bir modelleme tercih edilmiştir. Burada 3 faz iletkeni ve 1 nötr iletkeniden oluşan busbarlar, iki iletkenli iletim hattı olarak analiz edilmiş, hem deneysel S-parametreleri ölçümleri hem de modelleme çalışmaları bu 2-kapılı devre mantığı üzerine kurulmuştur. Ölçümler ve hesaplamalar 1-50 MHz bandında 630 A, 1250 A ve 2000 A' lik üç farklı akım kademesindeki busbarların L2-N sinyal iletim yolu için yapılmıştır.

Hesaplanan dirençler ( $\Omega/m$ )  $R_{630A}=0.08\sim 0.56$ ,  $R_{1250A}=0.029\sim 0.203$  ve  $R_{2000A}=0.016\sim 0.11$  arasında; endüktans ( $\mu H/m$ )  $L_{630A}=0.056\sim 0.045$ ,  $L_{1250A}=0.020\sim 0.016$  ve  $L_{2000A}=0.011\sim 0.009$  arasında; iletkenlik ( $mS/m$ )  $G_{630A}=0.097\sim 1.59$ ,  $G_{1250A}=0.24\sim 3.94$  ve  $G_{2000A}=0.4\sim 6.72$  arasında; kapasite ( $nF/m$ ) ise  $C_{630A}=0.77\sim 0.74$ ,  $C_{1250A}=1.91\sim 1.83$  ve  $C_{2000A}=3.25\sim 3.13$  arasında bir değişim göstermişlerdir. Elde edilen RLGC değerleri ile L2-N sinyal yolu için hesaplanan  $Z_c$  ( $\Omega$ ) değerleri  $Z_{c630A}=8.6\sim 7.78$ ,  $Z_{c1250A}=3.3\sim 2.98$  ve  $Z_{c2000A}=1.87\sim 1.69$ ; yayılım sabitleri ise  $\gamma_{630A}=0.042\sim 1.802$ ,  $\gamma_{1250A}=0.039\sim 1.707$  ve  $\gamma_{2000A}=0.038\sim 1.653$  şeklinde olmuştur.

Enerji hatları üzerinden yapılacak olan veri iletiminde çalışılan frekans bandında hattın nasıl davrandığını bilmek, oluşturulacak olan kanal modeli açısından büyük önem taşımaktadır. Busbar dağıtım sistemi için bu çalışmada elde edilen  $Z_c$  ve  $\gamma$  parametreleri ile kanalının transfer fonksiyonu iletim hattı teorisine göre hesaplanabilecek ve alandaki araştırmacılar için faydalı bir çıktı sağlayacaktır.

## Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Kurumu (TÜBİTAK)' nun 1003-Öncelikli Alanlar Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı 115E137 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- [1] EAE, E-Line KX Busbar Power Distribution System: [http://www.eae.com.tr/EAE-ENG/upload/E-Line\\_KX\\_Eng.pdf](http://www.eae.com.tr/EAE-ENG/upload/E-Line_KX_Eng.pdf) (Erişim Tarihi: 15.04.2018).
- [2] Du, Y., Burnett, J. & Fu, Z. C. (2000). Experimental and numerical evaluation of busbar trunking impedance, *Electric Power Systems Research*, 55, 113-119.
- [3] Battauscio, O., Chiampi, M. & Chiarabaglio, D. (1995). Experimental Validation of a Numerical-Model of Busbar Systems, *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 142, 65-72.

- [4] Canova, A. & Giaccone, L. (2009). Numerical and Analytical Modeling of Busbar Systems, *IEEE Transact. on Power Delivery*, 24, 1568-1578.
- [5] Jones, M. & Kelley, A. W. (2000). Wideband circuit model for busbar impedance. In *Proceedings of the Fifteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, New Orleans, LA., 2, 839-845.
- [6] Hasirci, Z. & Cavdar, I. H. (2018). S-Parameters-based Causal RLGC(f) Model of Busbar Distribution Systems for Broadband Power Line Communication, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 95, 561-567
- [7] Hasirci, Z., Cavdar, I. H. & Ozturk, M. (2017). Applicability Comparison of Transmission Line Parameter Extraction Methods for Busbar Distribution Systems, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 12, 586-593.
- [8] Hasirci, Z., Cavdar, I. H., Suljanovic, N. & Mujic, A. (2014). Investigation of Current Variation Effect on PLC Channel Characteristics of LV High Power Busbar Systems. In *Proceedings of the 5th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) European 2014 Conference*, İstanbul, Turkey, 1-5.
- [9] Bakhoun, E. G. (2011). S-Parameters Model for Data Communications Over 3-Phase Transmission Lines, *IEEE Trans. on Smart Grid*, 2, 4 615-623.
- [10] Hasirci, Z. (2017). *Broadband PLC Channel Modeling and Performance Analysis of Busbar Energy Distribution Systems* (Doctoral dissertation, Trabzon, Turkey, Karadeniz Technical University).
- [11] Papazyan, R., Petterson, P., Edin, H., Eriksson, R. & Gafvert, U. (2004). Extraction of High Frequency Power Cable Characteristics from S-parameter Measurements, *IEEE Trans. on Dielectrics and Insulation*, 11, 3 461-470.