

Akıllı Şebeke Uygulamalarında Alçak Gerilim Dağıtım Hatlarındaki Mevcut İletişim Modellerinin Karşılaştırılması

Comparison of the Available Communication Models of the LV Power Distribution Grid for Smart Grid Applications

Z.Hasırcı¹, İ. H. Çavdar¹, A. Mujčić², N. Suljanović²

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Karadeniz Teknik Üniversitesi
zhasirci@ktu.edu.tr, cavdar@ktu.edu.tr

²Faculty of Electrical Engineering
Tuzla University
nermin.suljanovic@gmail.com, aljo.mujcic@gmail.com

Özet

Bu çalışmada, akıllı şebekelerde bilgi ve iletişim teknolojilerinin gerekliliği açıklanmış ve akıllı şebeke iletişim mimarisi kısaca verilmiştir. Akıllı şebeke uygulamalarında alçak gerilim dağıtım hatları için önerilen enerji hattı iletişimi (PLC) modelleri sınıflandırılıp açıklanmıştır. Modeller deterministik ve istatistiksel modeller olarak iki ana grupta toplanabilmektedir. Deterministik modeller de kendi içinde ölçüm tabanlı çok yol modelleri ve iletim hattı teorisine dayalı modeller olarak gruplandırılabilir. Son olarak da öngörülen modeller arası karşılaştırmalar yapılmış, birbirlerine göre eksik ve üstün tarafları ortaya konmuştur.

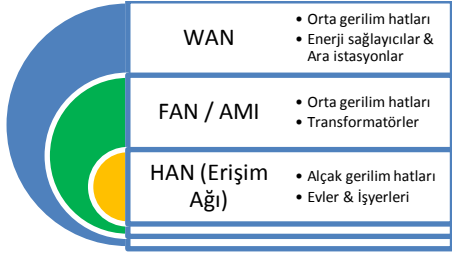
Anahtar kelimeler: Akıllı Şebekeler, Bilgi ve İletişim Teknolojileri, Dağıtım Şebekesi, Enerji Hatları Üzerinden İletişim, Kanal Modelleme, PLC.

1. Giriş

İletişimde, özellikle yüksek veri hızına sahip sistemlerin gerekliliği her geçen gün artmaktadır. Yüksek veri hızına sahip yani yüksek kapasiteli iletişim sistemleri için farklı teknolojiler mevcuttur. Bu sistemlere ek olarak enerji hattı iletişimi (PLC) de bu amaçla araştırılan bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır. Enerji hattı mevcut bir altyapıya sahip olduğundan, bir iletişim ortamı olarak kullanılma fikri diğer sistemlere göre daha uygun maliyetli olabilir [1]. Ancak, geleneksel iletim ve dağıtım sistemlerinde enerji sağlayıcıdan tüketiciye tek yönlü bir enerji aktarımı söz konusudur. Akıllı şebeke kavramı ise enerji sağlayıcıları ile tüketiciler arasında iki yönlü bir aktarımı destekler. Şebekenin geniş bir coğrafyaya dağılmış olması nedeniyle akıllı şebekelerde üretim-tüketim dengesini sağlamak için yeni gereksinimlere ihtiyaç vardır. Sistem altyapısı karmaşıktır çünkü geniş bir coğrafyada dağılmış çok sayıda iletim- dağıtım hatları, elektrik santralleri vb. mevcuttur. Yenilenebilir enerji kaynakları ve elektrikli araçlar bu şebekeye entegre edilebilmelidir. Talepler ve gereksinimler

güvenilirlik, verimlilik, güvenlik vb. kriterler de gözetilerek karşılanabilmeli, bunun yanı sıra daha da önemli olan bu taleplerin sadece doğru olarak değil aynı zamanda doğru zaman ve doğru yerde ihtiyaca cevap verebilecek bir düzeyde olması zorunluluğudur. Bu nedenle, bilgi ve iletişim teknolojileri gereken gelişmiş iletişim metodlarını kullanarak hâlihazırda mevcut olan şebekeye uyarlanarak kullanılmalıdır. Ayrıca tüm bunlar yapılırken, düşük gecikme, yüksek güvenilirlik ve ölçeklenebilirlik gibi teknik parametreler akıllı şebeke iletişim ihtiyaçları belirlenirken dikkate alınmalıdır [2], [3]. Yüksek hızlı ağ uygulamalarını desteklemek için bit hızını arttırmak, bilgi taşıyan elektriksiz sinyallerin enerji hattı üzerinden yayılımını esas alan enerji hattı iletişimi yani PLC günümüzün popüler araştırma konularındandır. Buradaki iletişim kanalı, iki düğüm arasında iletişim sinyalinin yayıldığı fiziksel kanal olarak tarif edilebilir [4], [5]. Farklı veri hızlarını sağlamak amacıyla ve farklı frekans bantlarında hizmet veren PLC türleri vardır [6]. CENELEC tarafından tanımlanan ve dar bant enerji hattı iletişimi (NBPLC) ağında kullanılan spektrum 9-140 kHz 'dir. Diğerleri ise en az 100 Mbps veri hızı sağlayan, 500 kHz - 30 MHz frekans aralığında hizmet sağlayan geniş bant enerji hattı iletişimi (BPLC) ağıdır. BPLC standardında sorumlu iki organizasyon vardır: *Home Plug Powerline Alliance* [7] ve *IEEE 1901* [8]. Şu anki mevcut şebeke tümleşik bir mimariye sahip değildir. Bu nedenle, sistem bileşenleri arasında hiçbir bağlantı yoktur. Ayrıca, iki yönlü iletişim sağlamak için de yeterli bant genişliği yoktur. Yani, akıllı cihazlar ile hızlı bir artış gösteren veri aktarımı gerekliliği ile baş edebilecek durumda değildir. Dolayısıyla, artan talepleri karşılamak amacıyla hiyerarşik bir mimarinin gerekliliği kaçınılmazdır. Bahsedilen iletişim ağı Şekil 1'deki gibi üç sınıfa ayrılır: Ev Alan Ağı (HAN), Besleme Alan Ağı (FAN) ve Geniş Alan Ağı (WAN) [9]. HAN, elektrikli ev aletleri ve otomatik akıllı metre arasındaki düşük bant genişlikli iletişimi destekler ve aynı zamanda izleme ve cihazların kontrolü uygulamalarını sağlar. FAN, tüketici (müşteri) ve trafo arasındaki elektrik dağıtım bölgesi için bir ağıdır. WAN yüksek bant genişlikli iletişimi destekler ve

geniş coğrafyada dağılmış olan küçük alan ağlarını birleştirmek için bir omurga görevi görür.



Şekil 1. Enerji şebekesi iletişim ağı genel topolojisi.

Akıllı şebeke yapısı Şekil 2’ de gösterildiği gibidir. Akıllı şebekeler, yenilenebilir enerji kaynaklarının (fotovoltaik güneş panelleri, rüzgâr türbinleri, küçük enerji santralleri vb.) ve şebekedeki elektrikli araçların kullanımı ile üretilen enerji ile bu enerjinin tüketimi arasında bir denge oluşturma çabasıdır.



Şekil 2. Akıllı şebeke yapısı [9].

Kullanıcılar, dağıtım ağındaki gelişmiş izleme ve ölçüm sistemleri yardımıyla tüketim oranlarını değerlendirerek enerji tüketiminde tasarrufa gidebilirler. Ayrıca, bu dağıtım sistemi elektrik dağıtımında ekonomik iyileşmelere katkı sağlayabilecek ve elektrik talep ve arzında olabilecek ani değişiklikleri azaltmaya yardımcı olacaktır [9]. Bu nedenle, dağıtım ağındaki gelişmiş ölçüm sistemleri, dağıtım ağı otomasyonu, kontrolü, izleme ve denetimleri için daha fazla öneme sahip olacaktır. Yani, akıllı şebekede bu uygulama birincil odak noktasıdır. Alçak gerilim (AG) dağıtım şebekelerinin enerji hattı haberleşme karakteristikleri farklı özellikler göstermektedir. Karakteristikler farklı frekans bantlarında da farklı olacaktır. AG dağıtım şebekelerinde iletişimi konu alan çeşitli çalışmalar literatürde mevcuttur [10] - [20].

2. AG Enerji Hatları İçin İletişim Kanalı Modelleri

AG dağıtım ağları PLC için *last mile* iletişim ağlarıdır. Bu yüzden PLC erişim ağları olarak tanımlanabilirler. Enerji dağıtım ağı, trafo ünitesi, güç kaynağı kabloları ve güç metreleri içeren bir iletişim kanalıdır [9]. AG enerji hattı iletişimi, bir noktadan çok noktaya bir iletişim sistemidir. Bu iletişim kanalında, frekansa ve zamana bağlı bir zayıflama vardır. Kanal modelleri, ağ topolojisine ve şebekede olan dallanmalardaki yüklerle bağlıdır. Bu kanalda, lokasyona

bağlı değişen renkli arka plan gürültüsü, AM yayını kaynaklı dar bant gürültü ve anahtarlama işlemleri nedeniyle oluşan dürtü gürültüsü tanımlanır. Ek olarak gürültülü yükler nedeniyle, kanalda girişimler de oluşmaktadır [16].

AG enerji hattının modellenmesi için literatürde iki temel yaklaşım vardır. İlk yaklaşım, zaman veya frekans domeninde yapılan deterministik modeller ile kanal temsil etmektir. İkinci yaklaşım ise istatistiksel modeller ile kanalı temsil etmektir. Deterministik modeller de iki ana gruptan oluşmaktadır. İlki, iletim hattı teorisine dayanmaktadır. Diğeri ise parametreleri ölçümleri ile elde edilen çok yol modelidir.

2.1. Deterministik Modeller

Bunlar, iletim hattı teorisine dayalı modeller ve ölçüm tabanlı çok yol modelleri olarak iki ana grupta sınıflandırılabilir.

2.1.1. Ölçüm tabanlı çok yol modelleri

Bu modeller *top-down* bir yaklaşımla oluşturulur ve iletişim kanalını, hem belli bir frekans aralığındaki frekans cevabı $H(f)$ hem de kanal ölçümleri ile elde edilen parametrelerle tanımlarlar [22]. Hatlarda çok sayıda dallanmalar ve hatlar arası güçlü çapraz kuplaj etkileri, iletişim sinyallerinin çeşitli yansımalara maruz kalmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle, frekansa bağlı zayıflama ve ağ topolojisi hesaba katılmalıdır. Enerji hatları kanal transfer fonksiyonlarını çıkarmak için yapılan ilk yaklaşım, çok yol senaryosunu içermez. [19] 'a göre, yüksek frekanslarda zayıflama artar ve basit doğru ile interpolate edilebilir. Bu nedenle, transfer fonksiyonu basit bir denklem ile hesaplanabilir. Ancak, çok yollu yayılım yaklaşımları enerji hatları iletim modeli için daha uygundur. Bu bağlamda karmaşık bir kanal transfer fonksiyonu ileri sürülmüştür [23]. Bu çalışmada, N farklı yoldan gelen sinyallerin toplamı, N adet birim vuruşun toplamı olarak temsil edilir ve böylece kanal vuruş tepkisi (1) gibi olacaktır.

$$H(f) = \sum_{i=1}^N p_i e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (1)$$

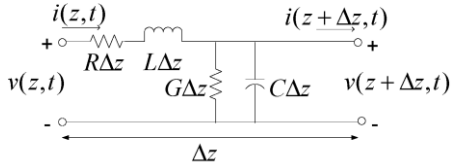
Bu model, alçak geçiren karakteristikleri birbiriyle ilişkisiz olan bina içi kanallar için uygundur. Daha sonra, (2)'deki gibi ek bir azalma faktörü ile uyarlanmış bir yankı modeli önerilmiştir [22].

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i e^{-(a_0 + a_1 f^k) d_i} e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (2)$$

Bu denklemde N , ilgili yayılım yollarının sayısıdır. a_0 , a_1 link zayıflama parametreleri olup frekans yanıtının genliğinden elde edilebilir. k , 0.5 ile 1 arasında değişen bir sabit ve g_i , her bir vuruşun genliğinden elde edilebilir. i , yolun ağırlıklandırma faktörüdür. d_i , i . yolun uzunluğu ve kanal vuruş tepkisi yardımıyla bulunabilen τ_i ise i . yolun gecikmesidir. Sonuç olarak, tüm parametrelerin yapılacak ölçümlerle belirlenmesi gerekir. Kanaldaki girişim, enerji hatlarının hat karakteristikleri kadar önemlidir. Çünkü bu hatlar AWGN kanal gibi davranmazlar. Buradaki girişim senaryosu, renkli arka plan gürültüsü, dar bant gürültü, senkron veya asenkron periyodik dürtüsel gürültülerden oluşur [24]. Öyleyse kanaldaki gürültüler de benzer bir şekilde sınıflandırılabilir [25].

2.1.2. İletim hattı teorisine dayalı modeller

İletim hatlarında gürültü, empedans ve zayıflama; zaman, frekans ve konuma göre değişebildiği için, yüksek frekanslı sinyaller için kanal çok kötüdür [26]. Bu sebepten ötürü, hattın transfer karakteristiklerini modellemek oldukça zordur. Bu modellerde, model parametreleri ve modelleme algoritmaları modelin güvenilirliğini ve doğruluğunu belirlemek için çok önemlidir. Model parametreleri zaman veya frekans domeninde iki şekilde elde edilebilir. Biri, model parametrelerinin ölçümlerle elde edildiği *top-down* yaklaşım [27] - [31], diğeri ise parametrelerin teorik olarak hesaplandığı *bottom-up* yaklaşımdır [32] - [34]. *Top-down* yaklaşım zaman domeni modellemeleri için daha uygundur. Çünkü enerji hatları çok yollu bir kanal gibi davranır ve fiziksel karakteristikleri bir yankı modeli yardımıyla elde edilebilir. [27]-[29], [32]. *Bottom-up* yaklaşımda, özellikle bir noktadan birçok dallanma söz konusuysa, yankı modelini uygulamak oldukça zordur. Çünkü enerji hattı ağındaki yansımaya ve gecikmeye sebep olan her yol hesaba katılmak zorundadır. Bu bağlamda, frekans domeninde yapılacak bir modelleme, saçılma ve iletim matrisleri ile bütün ağ davranışını tanımlayabilme konusunda bir avantaja sahiptir [30], [31], [33], [34]. Böylece ağ hangi karmaşıklıkta olursa olsun (N dallı ağ), tüm yansımaları hesaba katabilir. İletim hattı analizi için model parametreleri Şekil 3'deki gibi iletim hattı parçalı devre eşdeğer modeli ile elde edilebilir [34] veya çok iletkenli ağ matrislerinin Eigen analizi [33] ile elde edilebilir. Ardından iletim ve saçılma matrislerinde modelleme algoritmaları kullanılır.



Şekil 3. İki telli iletim hattı parçalı devre eşdeğeri [35].

$v(z, t)$ ve $v(z + \Delta z, t)$, z ve $z + \Delta z$ noktalarındaki ani gerilim değerleri; $i(z, t)$ ve $i(z + \Delta z, t)$, z ve $z + \Delta z$ noktalarındaki ani akım değerleridir. R , birim uzunluktaki direnç (Ω/m); C , birim uzunluktaki kapasite (F/m); L , birim uzunluktaki endüktans (H/m) ve G , birim uzunluktaki iletkenliktir (S/m). Amaç, (3) ve (4) denklemleriyle verilen karakteristik empedans Z_0 ve yayılım sabiti γ 'yı elde etmektir [36]. Bu parametreler kanalın transfer fonksiyonunu modelleyebilmek için gereklidir. Burada α , zayıflama (Np/m) olup β ise faz sabitidir (rad/m).

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

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (4)$$

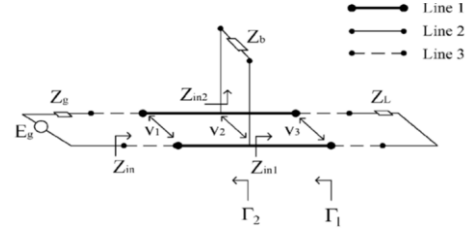
Parametrelerin kestiriminden sonra, hattın açık devre ve kısa devre durumlarında giriş empedansları ölçülerek parametreler kestirilen parametrelerle karşılaştırılmış olur. Kanal transfer fonksiyonunu elde etmek için, dalga yayılımındaki ana zayıflama çeşitleri de (hat zayıflaması, empedans uyumsuzlukları nedeniyle oluşan yansımalar, geciken dalgalar nedeniyle oluşan zayıflamalar vb.) hesaba katılmalıdır [35].

PLC Şekil 4' deki gibi N adet dallanması olan bir ağ gibi davranır.



Şekil 4. N adet dallanması olan PLC ağı.

Bu nedenle, kanalı Şekil 5' deki gibi kolayca analiz edebilmek için, sistemin tümünü kas kat bağlı N adet tek dallanmalı ağlar olarak bölünebilir. İletim ve yayılım parametrelerini içeren yansıma faktörleri tabanlı bir kanal modeli [37]' de verilmiştir. Z_g , kaynak empedansı (50Ω); Z_L , hat sonu yük empedansı (50Ω), Z_b , dallanmış hat sonu yük empedansı; Z_{in1} , dallanmış hattın sağındaki giriş empedansı; Z_{in2} , dallanmış hat giriş empedansı; Z_{in} , hattın giriş empedansı; Γ_1 , hat sonu yansıma katsayısı ve Γ_2 , dallanma noktası yansıma katsayısı olarak verilmiştir. Ayrıca, 1. hat, (Z_0, γ) hat parametrelerine sahip hat; 2. hat, (Z_0', γ') hat parametrelerine sahip dallanmış hat ve 3. hat, 50Ω karakteristik empedansa sahip iletim hattıdır.



Şekil 5. Tek dallanmalı ağ örneği [35].

Mikro dalga teorisinde, çok sayıda tek dallanmanın olduğu ağlar için saçılım matrislerini elde etmek için zincir saçılma matrisleri ve sinyal akış grafiği olmak üzere iki genel yaklaşım vardır [35]. T-matrisi yardımıyla da tüm sistemin S-matrisi (5)' deki gibi elde edilebilir.

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T_{21}}{T_{11}} & T_{22} - \frac{T_{21}T_{12}}{T_{11}} \\ \frac{1}{T_{11}} & -\frac{T_{12}}{T_{11}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

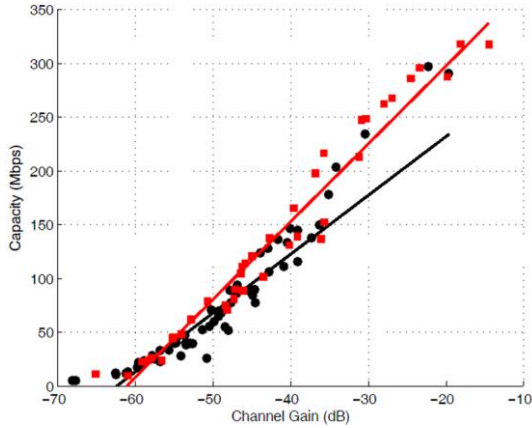
S-matrisindeki S_{21} , ilgili ağın transfer fonksiyonunu verir [35]. Bunun sonrasında hem transfer karakteristikleri hem de model parametreleri enerji hatlarında yapılacak ölçmelerle doğrulanabilir.

2.2. İstatistiksel modeller

Deterministik modeller kanalın transfer fonksiyonunu ya link topolojisi tamamen biliniyorsa ya da parametreler başlangıç ölçümleri ile elde edilebiliyorsa bulabilir. Ancak link topolojilerindeki değişkenlik ve kablolama çeşitliliği nedeniyle sabit bir kanal durumu olmayacak ve deterministik modeller için istatistiksel yaklaşımlar yapmak anlamlı olacaktır [38]. Dallanmalar ve yükler sebebiyle oluşacak süreksizliklerin yer seçimi Poisson dağılıma göre yapıp, yankıları tek tek üretip vuruş tepkisini zaman domeninde oluşturmak ulusal kablolama uygulamalarından bağımsız bir model oluşturmak için faydalı olacaktır. Bu yaklaşım [39]' da verilmiştir ancak deneysel çalışmalarla kanıtlanmamıştır. Dahası, frekansa bağlı zayıflama ve Poisson dağılımın

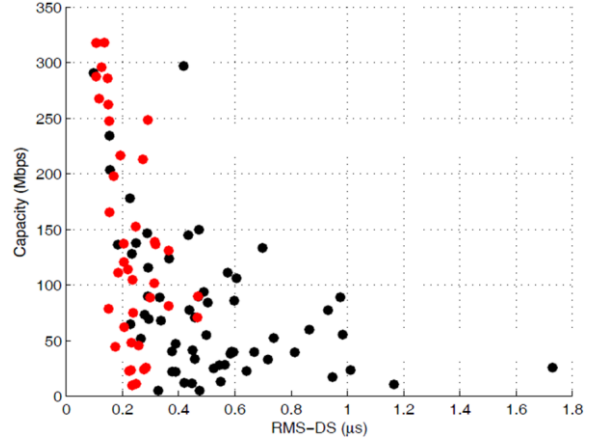
yoğunluğu için seçilecek kurulum parametreleri, belirli bir senaryo için bir rehber ihtiyacı duyacaktır. İstatistiksel yaklaşımlar için olan diğer bir çalışma ise, kanal modelleme için çeşitli sınıflar ve onların transfer fonksiyonlarını tanımlamıştır [40]. Burada *peak* ve *notch* genişlikleri Rayleigh dağılımla, yükseklikleri ise üçgen dağılımla modellenmiştir. Bu modelin transfer fonksiyonu *smooth* olup Gaussian dağılımla temsil edilmiştir.

PLC modellerin anlamlı istatistiksel karakterizasyonunun fiziksel olarak ortaya konma sıkıntısından dolayı, kanal ölçümlerine dayalı olarak alçak ve orta gerilimli PLC kanallarının güç kazancı (*channel power gain*) ve RMS yayılım gecikmesinin (*RMS delay spread*) lognormal rastlantı değişkenleri ile ilişkili olduğu ortaya çıkmıştır. Bu durum diğer kablolu iletim hattı haberleşme kanalları için de bir karakteristik olarak kabul edilmiştir [41]. Bu bilgi ışığında, kanal kazancı ve RMS yayılım gecikmesi arasında bir kanal kazanç normalizasyonunun gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bir diğer çalışma ise deterministik kanallara istatistiksel bir yaklaşım göstermiş, link topolojileri ve kablolama değişkenliğini de içeren bir model sunmuştur [38]. Ayrıca bu çalışmada, kanal kapasitesinin RMS yayılım gecikmesi ile olan ilişkisi de ortaya konmuştur. Fazla RMS yayılım gecikmesi varsa yani çok yollu yayılım etkisi çoksa, kanal kapasitesi düşük olacaktır sonucuna varılmıştır. Enerji iletim hatlarında istatistiksel modelleme yapmak, anlamlı bir kapsama ve özellikle akıllı şebeke uygulamalarındaki PLC kapsamını belirlemek için faydalı olabilir [42]. İstatistiksel yaklaşımların sonucu olarak, AG-OG PLC kanalları, log normal dağılım gösteren bir zayıflama profiline sahiptir. Alıcıdaki kanal bozulması, kabloların alçak geçiren bir yapıda olması ve çok yollu yankıların alıcıya ulaşma sürelerindeki farklılıklardır. Şekil 6'da gösterildiği üzere, PLC kanalın ortalama kazancı log normal bir dağılım gösterir ve kapasite ile de pozitif bir korelasyona sahiptir.



Şekil 6. Ev içi PLC kanal ölçümlerinin iki durumu için Kapasite-Kanal kazancı değişimi (siyah daireler yarı kentsel alan, kırmızı kareler kentsel alan) [38].

Fazla RMS yayılım gecikmesi ise düşük kanal kapasitesi anlamına gelir. Şekil 7'de görüldüğü üzere kanal kazancı ve RMS yayılım gecikmesi arasında da negatif bir korelasyon vardır [38].



Şekil 7. Ev içi PLC kanal ölçümlerinin iki durumu için Kapasite-RMS gecikme yayılımı değişimi (siyah daireler yarı kentsel alan, kırmızı kareler kentsel alan) [38].

3. Sonuçlar ve Değerlendirme

Alçak gerilim hatlarındaki iletişim uygulamaları için önerilen modellerden biri ölçmeye dayalı çok yol modelleridir [22], [27], [28], [43]. Bu modelde, model parametreleri (N adet dallanma, zayıflama, gecikme, vb.) kanalda yapılan ölçmeler sonucu elde edilebilirler. İyi bilinen ve kabul gören bir yaklaşım olmakla birlikte bu çok yol modeli enerji hattı iletişim kanalının ön bir transfer fonksiyonunu elde etmek için uygun değildir. Ayrıca kanaldaki parazitik kapasiteleri ve endüktansları, kablolama uygulamaları vb. diğer bazı etkileri de içermeyen bir yaklaşımdır. Bu nedenle bu modeller kanal tepkeleri için yanlış zaman gecikmeleri tahmin ederler ve özellikle N adet dallanmalı PLC için bir kanal modeli ortaya koyma konusunda uygun bir yaklaşım değildir [44]. Bu etkiler sadece yapılan başlangıç ölçümleri yardımıyla "fenomenolojik" olarak belirlenebilir [38]. [27]'de önerilen modelde kabloların zayıflama etkileri hesaba katılmadığından, çok taşıyıcılı sistemlerde kötü performansa yol açtığı görülmüştür [44]. Ölçmeye dayalı çok yol modellerin aksine, iletim hattı teorisi tabanlı modeller (zaman ya da frekans domeni tabanlı) başlangıç ölçümlerine gerek duymaksızın kanal parametrelerini öncelikli bir hesaplama ile bulabilme üstünlüğüne sahiptir [32]. İki iletkenli iletim hattında sinyalin yayılımı esnasında, hattın her parçası küçük devre parçası gibi davranır. Bu nedenle, link topolojisi bu yaklaşımda çok iyi bilinmek zorundadır. Eğer zaman domeni yaklaşımı yapılırsa, hattaki dallanma ve süreksizlikler sebebiyle ve dallanmalardan doğan her olası yolun üretilme gerekliliği nedeniyle analiz karmaşıklığı artacaktır. Bu nedenle iletim hattı tabanlı deterministik modellerde frekans domeni yaklaşımı zaman domeni yaklaşımına göre daha anlamlı olacaktır [9]. Bu tip modellemedeki zorluğu ise tüm link topolojisinin çok iyi bilinme zorunluluğudur.

Önerilen istatistiksel kanal modelleri, deterministik modellerdeki vuruş tepkisi ölçmelerindeki zorluklara istatistiksel ortalamaları kullanma gibi bir çözüm getirerek daha kolay bir çözüm sağlayabilir [38]. Bu modeller kanal kazancı ve RMS yayılım gecikmesi arasında negatif korelasyon bulunan çeşitli kablolu hat kanallarını temsil etmede oldukça başarılıdır. Bunun yansısı doğru kapasite - kapsama analizi ve çok taşıyıcılı parametre optimizasyonu

vb. konularda üstünlüklere de sahiptirler. Enerji hatları için genel kabul görmüş ve geçerliliği olan istatistiksel modellerin yetersizliği nedeniyle, diğer iletişim teknikleriyle karşılaştırma yapabilmek oldukça zordur.

Kaynaklar

- [1] Selander, L., "Call Me Call Me for Some Overtime - On Organizational Consequences of System Changes," Dissertation, The School of Economics and Management, Lund Univ., Lund, Sweden, 2008.
- [2] Open Smart Grid-Open SG, (2010). "SG Networks System Requirements System Specifications," Tech. Rep. v4.0-parents-r0.4, [Online]. Available: <http://osgug.ucaiug.org/UtiliComm/Shared%20Documents/Forms/AllItems.aspx?RootFolder=%2FUtiliComm%2FShared%20Documents%2FSG-NET%20PAP%20work-inprogress.&View=%7BDB95205C-1142-45B1-97C0-A4DD7F9EC4DA%7D>.
- [3] Daoud, M. ve Fernando, X., "On the Communication Requirements for the Smart Grid," *Energy and Power Engineering*, vol. 3, pp. 6-11, 2011.
- [4] Anderson, J.B., "Digital Transmission Engineering", IEEE Press, 1998.
- [5] Proakis, J.G., "Digital Communications", McGraw-Hill, 1995.
- [6] Wikipedia, (2012). "Power Line Communication," [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Power_line_communication.
- [7] G HomePlug Powerline Alliance, (2005). "HomePlug AV," [Online]. Available: https://www.homeplug.org/tech/whitepapers/HPAV-White-Paper_050818.pdf.
- [8] "IEEE Draft Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications," IEEE P1901/D4. 01, July 2010, pp. 1-1589, 2010.
- [9] Suljanović, N. ve Mujčić, A., ICT for Smart Power Grid, ELKL5910 Lecture Notes, Trabzon: Karadeniz Technical University, 2012.
- [10] Lin, Y.-J., Latchman, H. A., Lee, M. ve Katar, S., "A power line communication network infrastructure for the smart home," *IEEE Wireless Commun. Mag.*, vol. 9, no. 6, pp. 104-111, Dec. 2002.
- [11] Pavlidou, N., Han Vinck, A. J., Yazdani, J. ve Honary, B., "Power line communications: State of the art and future trends," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 4, pp. 34-40, Apr. 2003.
- [12] Baig S. ve Gohar, N. D., "A discrete multitone transceiver at the heart of the phy layer of an in-home power line communication local-area network," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 4, pp. 48-53, Apr. 2003.
- [13] Lin, Y.-J., Latchman, H. A., Newman, R. E. ve Katar S., "A comparative performance study of wireless and power line networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 4, pp. 54-63, Apr. 2003.
- [14] Abad, J., Badenes, A., Blasco, J., Carreras, J., Dominguez, V., Gomez, C., Iranzo, S., Riveiro, J. C., Ruiz, D., Torres, L. M., ve Comabella, J., "Extending the power line lan up to the neighborhood transformer," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 4, pp. 64-70, April 2003.
- [15] Gebhardt, M., Weinmann, F. ve Dostert, K., "Physical and regulatory constraints for communication over the power supply grid," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 5, pp. 84-90, May 2003.
- [16] Bighieri, E., "Coding and modulation for a horrible channel," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 5, pp. 92-98, May 2003.
- [17] Jee, G., Edison, C., Das Rao, R. ve Cern, Y., "Demonstration of the technical viability of plc systems on medium- and low-voltage lines in the united states," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 5, pp. 108-112, May 2003.
- [18] Liu, W., Widmer, H. ve Raffin, P., "Broadband PLC access systems and field deployment in European power line networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 5, pp. 114-118, May 2003.
- [19] Gotz, M., Rapp, M. ve Dostert, K., "Power line channel characteristics and their effect on communication system design," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 4, pp. 78-86, Apr. 2004.
- [20] Henry, P. S., "Interference characteristics of broadband power line communication systems using aerial medium voltage wires," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, no. 4, pp. 92-98, Apr. 2005.
- [21] Gao, J., Xiao, Y., Liu J., Liang, W. ve Philip Chen, C.L., "A survey of communication/networking in Smart Grids," *Future Generation Computer Systems*, vol. 28, no. 2, Feb. 2012, pp. 391-404.
- [22] Zimmermann, M. ve Dostert, K., "A Multipath Model for the Power line Channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 4, Apr. 2002, pp. 553-59.
- [23] Philipps, H., "Modelling of Powerline Communication Channels," in *Proc. 3rd Int'l. Symp. Power-Line Commun. and its Applications*, Lancaster, UK, 1999, pp. 14-21.
- [24] Zimmermann, M. ve Dostert, K., "Analysis and Modeling of Impulsive Noise in Broad-Band Power Line Communications," *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 44, no. 1, Feb. 2002, pp. 249-58.
- [25] Hensen, C. ve Schulz, W., "Time Dependence of the Channel Characteristics of Low Voltage Power-Lines and its Effects on Hardware Implementation," *AEÜ Int'l. J. Electronics and Commun.*, vol. 54, no. 1, Feb. 2000, pp. 23-32.
- [26] Tang, L. T., So, P. L., Gunawan, E., Chen, S., Lie, T. T. ve Guan, Y. L., "Characterization of in-house power distribution lines for high-speed data transmission," in *Proc. 5th Int. Power Engineering Conf. (IPEC 2001)*, May 2001, pp. 7-12.
- [27] Philipps, H., "Modeling of powerline communication channels," in *Proc. 3rd Int. Symp. Power-Line Communications and its Applications (ISPLC 99)*, Mar. 1999, pp. 14-21.
- [28] Zimmermann, M. ve Dostert, K., "A multi-path signal propagation model for the power line channel in the high frequency range," in *Proc. 3rd Int. Symp. Power-Line Communications and its Applications (ISPLC 99)*, Mar. 1999, pp. 45-51.
- [29] Tang, L. T., So, P. L., Gunawan, E., Guan, Y. L., Chen, S. ve Lie, T. T., "Characterization and modeling of in-building power lines for high-speed data transmission," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 18, pp. 69-77, Jan. 2003.
- [30] Esmailian, T., Kschischang, F. R., ve Gulak, P. G., "An in-building power line channel simulator," in *Proc. 4th Int. Symp. Power-Line Communication and its Applications (ISPLC 2000)*, Apr. 2000.
- [31] Banwell, T. C. ve Galli, S., "A new approach to the modeling of the transfer function of the power line channel," in *Proc. 5th Int. Symp. Power-Line Communications and its Applications (ISPLC 2001)*, Apr. 2001.
- [32] Meng, H., Chen, S., Guan, Y. L., Law, C. L., So, P. L., Gunawan, E. ve Lie, T. T., "A transmission line model for high-frequency power line communication channel," in *Proc. 5th Int. Conf. Power System Technology (PowerCon 2002)*, Oct. 2002.
- [33] Sartenaer, T. ve Delogne, P., "Power cables modeling for broadband communications," in *Proc. 5th Int. Symp. Power-Line Communications and its Applications (ISPLC 2001)*, Apr. 2001.
- [34] Anastasiadou, D. ve Antonakopoulos, T., "An experimental setup for characterizing the residential power grid variable behavior," in *Proc. 6th Int. Symp. Power-Line Communications and its Applications (ISPLC 2002)*, Mar. 2002.
- [35] Meng, H., Chen, S., Guan, Y. L., Law, C. L., So, P. L., Gunawan, E. ve Lie, T. T., "Modeling of transfer Characteristics for the broadband power line communication channel," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 19, no. 3, pp. 1057-1064, July 2004.

- [36] Cheng, D. K., *Fundamental of Engineering Electromagnetics*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- [37] Anatory, J., Kissaka, M.M. ve Mvungi, N.H., "Channel Model for Broadband Powerline Communication", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 22, no. 1, January 2007, pp. 135-141.
- [38] Galli, S., "A Novel Approach to the Statistical Modeling of Wireline Channels," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 5, pp. 1332 - 1345, May 2011.
- [39] Tonello, A., "Wide band impulse modulation and receiver algorithms for multiuser power line communications," *J. Advances Signal Process.*, vol. 2007, article ID 96747, 2007.
- [40] Tlich, M., Zeddani, A., Moulin, F. ve Gauthier, F., "Indoor power-line communications channel characterization up to 100 MHz—part I: oneparameter deterministic model," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 23, no. 3, pp. 1392–1401, July 2008.
- [41] Galli, S., "A simplified model for the indoor power line channel," in *Proc. IEEE Intl. Symp. Power Line Commun. Appl.*, Mar. 2009.
- [42] Galli, S., Scaglione, A. ve Wang, Z., "For the grid and through the grid: the role of power line communications in the smart grid," in *Proc. IEEE*, 2011. Available: <http://arxiv.org/abs/1010.1973>
- [43] Barnes, J., "A physical multi-path model for power distribution network propagation," in *Proc. Intl. Symp. Power Line Commun. Appl.*, Mar. 1998.
- [44] Anatory, J. ve Theethayi, N., "Comparison of different Channel Modeling Techniques used in the BPLC Systems" , *International Journal of Computer & Information Engineering*, vol.4, no. 4, Oct. 2010, pp. 241.