

Analiza evoluției comunicației prin liniile electrice de exterior

C. Maleș, V. Popa, *Universitatea „Ștefan cel Mare” Suceava*

Abstract—In this paper are analysed PLC (Power Line Communications) protocols and their evolution until the present day. The article presents aspects of IEEE 1901.2 standard, which regulates communications in narrowband (3-500 kHz), and the theoretical and practical results used in the protocols developed by PRIME Alliance and ERDF. The paper highlights the huge potential of power line communications on LV and MV, and the issues raised by the existence of the electrical transformers between them. Thus, a comparative study involving the performances of PLC protocols was made. In conclusions are presented elements that can influence the implementation of an electrical meter reading system based on PLC. Some issues that were not analysed until now regarding the implementation of an electrical meter reading system on a large scale are also presented.

Index Terms—CSMA/CA, DBPSK, ERDF, OFDM, PLC, PRIME, P1901.2

I. INTRODUCERE

Comunicațiile prin rețeaua electrică pot fi descrise ca un transfer de date care utilizează ca mediu fizic liniile de alimentare cu energie electrică. Acest tip de comunicații este cunoscut în literatura de specialitate sub abrevierea PLC (Power Line Communications) [1]. Comunicația PLC ar putea utiliza întreaga structură a unei rețele electrice, respectiv liniile de înaltă tensiune (100 kV-400 kV) sau de foarte înaltă tensiune (>400 kV), liniile de medie tensiune (1 kV-100 kV) și liniile de joasă tensiune (230V, 400V), care alimentează consumatorii casnici și industriali prin intermediul transformatoarelor din structura acesteia. Până în prezent s-au utilizat, ca mediu de comunicație, doar liniile de joasă tensiune, existând însă și soluții pentru liniile de medie tensiune. Comunicația prin rețeaua electrică este utilizată la monitorizarea și administrarea contoarelor electrice, de apă și de gaz, având drept competitori soluțiile oferite de rețelele fără fir și cablate. Transferul de date este realizat așadar folosind purtătoare din banda de frecvențe 3 kHz – 500 kHz, aceasta fiind adaptată conform prevederilor țărilor sau referințelor geografice unde comunicația PLC este utilizată.

În prezenta lucrare sunt analizate aspecte care țin de comunicația PLC, protocoalele de comunicație și propunerile pentru crearea noului standard IEEE 1901.2 ce va reglementa comunicația PLC în bandă îngustă.

II. COMUNICAȚIA PLC

Comunicația prin rețeaua de alimentare cu energie

electrică necesită respectarea unor reglementări emise de instituții recunoscute pe plan mondial, precum CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization), FCC (Federal Communications Commission), ARIB (Association of Radio Industries & Businesses) sau EPRI (Electric Power Research Institute) și trebuie să îndeplinească anumite performanțe, pentru a asigura un transfer de date eficient și pe distanțe cât mai mari. Cele mai importante benzi în care are loc comunicația sunt reglementate astfel: în Europa - CENELEC banda A (3 kHz – 95 kHz), în SUA – FCC banda 10 kHz – 490 kHz, în Japonia – ARIB banda 10 kHz – 450 kHz și în China – EPRI în banda 3 kHz – 90/500 kHz.

Cele mai importante standarde care reglementează comunicația PLC sunt:

- EN 50065 - Transmisia semnalelor prin rețelele electrice de joasă tensiune în banda de frecvențe de la 3 kHz până la 148,5 kHz. Partea 1: Cerințe generale, benzi de frecvențe și perturbații electromagnetice;

- IEC/TS 61334-5-4 - Automatizarea distribuției electrice folosind liniile purtătoare de tensiune;

- IEEE P1901 - Comunicația în bandă largă în rețelele electrice: controlul accesului la mediu și specificații ale nivelului fizic;

- IEEE P1901.2 (în lucru) - standard pentru comunicația în bandă îngustă pentru aplicațiile de rețea electrică „inteligentă”.

Pentru efectuarea comunicației și creșterea performanțelor pot fi identificate două generații de tehnici de comunicație în evoluția utilizării modulațiilor. Prima generație a utilizat modulațiile ASK (Amplitude Shift Keying), SFSK (Spread Frequency Shift Keying) și BPSK (Binary Phase Shift Keying), în paralel cu modulația DCSK (Differential Code Shift Keying) care se află sub licența companiei Yitran. Aceste tehnici de comunicație utilizau tehnica de împrăștiere a spectrului DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum). Utilizarea DSSS nu permitea obținerea unei viteze de comunicație mai mari de 9,6 kbps, de asemenea distanța de comunicație era limitată la 400 metri [2]. De asemenea aceste tehnici de comunicație nu ofereau posibilitatea transferului comunicației de pe linia de JT (joasă tensiune) pe linia de MT (medie tensiune) fără utilizarea echipamentelor de traversare a transformatorului. A doua generație utilizează modulațiile bazate pe DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying) și

tehnica de împrăștiere a spectrului OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), datorită cărora se pot obține viteze de până la 140 kbps pe distanțe de ordinul kilometrilor. Spre deosebire de prima generație, aceasta permite efectuarea comunicației între liniile de JT și MT prin intermediul transformatorului electric.

La fel ca și la alte protocoale de comunicație, avantajele și dezavantajele PLC sunt direct corelate cu mediul utilizat pentru fluxul de date, respectiv linia electrică. Liniile electrice nu au fost proiectate pentru a asigura un transfer de date, astfel că nu asigură un nivel minim de protecție la perturbații electromagnetice și nici un factor constant de propagare. Neadecvarea mediului electric la transferul de date se concretizează prin atenuarea semnalului PLC în special pe linia de JT (joasă tensiune) și la traversarea transformatorului. Perturbațiile electromagnetice se datorează regimului de funcționare al echipamentelor electronice ce induc în rețeaua electrică fluctuații în regim aleator [1]. Formele sub care perturbațiile electromagnetice pot apărea în rețeaua electrică sunt: zgomot impulsiv, zgomot alb Gaussian, zgomot colorat, zgomot de sincronizare și zgomot de cvasi-sincronizare [3]. Unul dintre cele mai importante avantaje ale rețelei electrice este nivelul mare de acoperire, oriunde se face alimentare cu energie electrică de la o rețea națională, ceea ce oferă posibilitatea utilizării liniilor electrice pentru transfer de date fără instalarea unor medii noi de comunicație, cu sau fără fir. Alternativele utilizării PLC sunt: GPRS, WiFi, WiMAX, rețeaua de telefonie fixă, rețeaua de internet cablată ș.a.

Un alt factor care influențează comunicația PLC este cuplajul la linia electrică, un element foarte important în structura rețelei PLC, întrucât influențează nivelul de atenuare a semnalului transmis/recepționat. Cuplajul se realizează în două moduri: inductiv și capacitiv, cel de-al doilea fiind cel mai utilizat [1].

O altă problemă a comunicației PLC a fost inexistența unui standard până la începutul anului 2011, când a fost publicat standardul IEEE P1901 ce reglementează acest tip de comunicație [4], pentru comunicația în bandă largă cu utilizarea frecvențelor mai mici de 100 MHz. Un standard care să trateze comunicația în bandă îngustă (3 – 500 kHz) prin rețeaua electrică nu este încă publicat, IEEE P1901.2 aflându-se în lucru [5].

III. PROTOCOALE DE COMUNICAȚIE

Comunicația PLC a fost utilizată la transmiterea semnalelor de control în cadrul rețelelor electrice încă de la începuturi. În anii '50, comunicația PLC era folosită unidirecțional pentru controlul iluminatului public. Mai târziu, în anii '70, odată cu apariția protocolului X-10 și mai apoi, în anii '90, când platforma LonWorks a permis comunicația bidirecțională, comunicația PLC a cunoscut o dezvoltare treptată dar importantă ce a dus la apariția tehnicilor de azi. Pentru a putea comunica prin rețeaua

electrică producătorii au dezvoltat protocoale proprii, neexistând un standard internațional care să reglementeze acest tip de transfer. Printre cele mai importante protocoale PLC se regăsesc: X-10, CEBus, Lontalk, KNX PL, IEC61334, G3-PLC, PRIME. Principalele specificații ale acestor protocoale sunt:

- 1) X-10: modulație ASK, frecvență 120 kHz, viteză de transfer 50 bps [6];
- 2) Intellon CEBus (EIA-600): modulație ASK, tehnica acces la mediu CSMA/CDCR (Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection and Collision Resolution), viteză de transfer 10 kbps, tehnică de împrăștiere a spectrului: salt în frecvență – 200 kHz ->400 kHz ->100 kHz -> 200 kHz [1];
- 3) Lontalk (EIA-709/LonWorks): tehnica de acces la mediu CSMA/CA, bandă de frecvențe 125 kHz – 140 kHz, modulație BPSK, viteză de transfer 5,5 kbps, dezvoltat de Echelon Corp. [7];
- 4) KNX PL 110: bandă de frecvențe 90 – 125 kHz, modulație SFSK, viteză de transfer 1,2 kbps[8];
- 5) IEC 61334: medii fizice utilizate: MT, JT; bandă de frecvențe: CENELEC A, modulație SFSK, tehnică de acces la mediu SS-FFH (Spread Spectrum-Fast Frequency Hopping) [9].

Au urmat un alt tip de protocoale, aparținând celei de a doua generații, utilizate în comunicația PLC în bandă îngustă, reprezentate de propunerile G3-PLC și PRIME în vederea realizării standardului IEEE P1901.2. Acestea utilizează banda CENELEC A (3 kHz – 95 kHz) pentru Europa, iar pentru SUA banda 3 – 500 kHz reglementată de FCC, precum și alte aspecte reglementate de standardul EN50065-1.

- 6) PLC-G3 este propunerea ERDF (Electricite Reseau Distribution France) pentru noul standard IEEE P1901.2. Modelul propus utilizează tehnica de împrăștiere a spectrului OFDM și tehnica de acces la mediu CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance). În specificații se propune utilizarea doar a unei părți din banda CENELEC A, și anume intervalul 35,9 kHz – 90,6 kHz. Astfel, PLC-G3 își propune să asigure comunicația prin mediile electrice de JT și MT. Modulațiile utilizate sunt DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying), DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) și Robust (codul este repetat de 4 ori de un bloc specializat al transmisorului numit „Interleaver”). Viteza de transfer poate ajunge până la 34,7 kbps la utilizarea DQPSK; la 20,3 kbps în cazul DBPSK și la 5,7 kbps pentru modul Robust. Prin utilizarea acestor specificații se dorește realizarea comunicației dintre linia de MT și cea de JT fără echipamente de traversare a transformatorului [10].
- 7) Compania Iberdrola [11] este coordonatorul proiectului Powerline Intelligent Metering Evolution (PRIME), proiect dezvoltat împreună cu organizația PRIME

Alliance pentru formarea noului standard PLC. Modelul propus are la bază specificațiile stivei din protocolul IEEE Std. 802.16 și utilizează tehnica de împrăștiere a spectrului OFDM și tehnica de acces la mediu CSMA/CA. În specificații se propune utilizarea doar a unei părți din banda CENELEC A, și anume intervalul 41,992 kHz – 88,867 kHz, deoarece frecvențele sub 40 kHz prezintă probleme severe în rețelele electrice europene cauzate de zgomot. Numărul de frecvențe purtătoare utilizat este 97 și semnalul este modulat DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying), DQPSK (Differential Quaternary Phase Shift Keying) sau D8PSK (Differential Eight-Phase Shift Keying). Conform specificațiilor PRIME, comunicația ar trebui să se realizeze cu viteze de 47 kbps, 94 kbps și 141 kbps. Scopul final al specificațiilor PRIME este cel de a asigura interoperabilitatea comunicației PLC cu arhitectura unei rețele tipice de date, integrând capabilitățile unei conexiuni la internet [12].

IV. STUDIU COMPARATIV AL PROPUNERILOR PENTRU STANDARDUL IEEE P1901.2

IEEE P1901.2 este standardul care urmează a fi publicat pentru aplicațiile cu comunicații în bandă îngustă, în domeniul de frecvențe 3 – 500 kHz, având drept suport rețeaua electrică. Standardul IEEE P1901.2 va reglementa comunicația prin rețeaua electrică cu tensiuni de până la 72 kV și prin transformatoarele de MT/JT. Standardul anunță viteze de comunicație de până la 500 kbps. Acest standard va fi compatibil cu tehnologiile existente PRIME și G3-PLC, care se bazează pe tehnica de multiplexare OFDM [13].

A. Evaluarea performanțelor

TABEL 1
STUDIUL COMPARATIV AL PROTOCOALELOR PLC

STANDARD	TEHNOLOGIE E MODULAȚIE	TEHNOLOGIE E ÎMPRĂȘTIER E SPECTRU	BANDĂ DE FRECVENȚE	VITEZĂ TRANSFER (KBPS)
PLC-G3	DBPSK	OFDM	30-90,6 kHz	5,6-34,7
PRIME	DBPSK	OFDM	42-89 kHz	21,4-128,6
IEEE P1901.2	-	OFDM	9-500 kHz	ÎN LUCRU
ANSI/EIA 709.1.2	BPSK	DSSS	86, 131 kHz	3,6-5,4
KNX	SFSK	DSSS	125-140 kHz	1,2
IEC61334	SFSK	DSSS	CENELEC A	2,4
X-10	ASK	DSSS	120 kHz	0,5

Se poate observa în tabelul 1 evoluția de la modulația în amplitudine spre cea în frecvență, pentru ca în final să fie aleasă o modulație în fază (PSK), capabilă să asigure o rezistență sporită la interferențe. De asemenea se poate observa o creștere a vitezei de comunicație, odată cu trecerea de la OFDM la DSSS.

B. Rezultate teoretice și practice ale PRIME și PLC G3

Până la această dată, în cadrul manifestărilor științifice internaționale s-au prezentat rezultate referitoare la transferul

de date și simulări ale modelului PRIME. Astfel au fost obținute în urma simulării viteze de transfer de 21,4 kbps, 42,9 kbps și 64,3 kbps, utilizând ca modalitate de corecție a erorilor FEC (Forward Error Correction) de tip activ. La dezactivarea FEC aceste viteze au fost duble. Modulațiile utilizate sunt DBPSK, DQPSK, D8PSK. S-a mai observat și o scădere a BER (Bit Error Rate) la utilizarea FEC cu până la 25% [14]. Într-un articol prezentat la ISPLC ediția 2010 [15], reprezentanții companiei Maxim au prezentat rezultatele obținute în urma simulării modelului PLC G3, obținând rate de transfer de 5,5 kbps, 20 kbps și 34,1 kbps folosind modulațiile ROBUST, DBPSK și DQPSK.

TABEL 2
REZULTATE TESTE PRACTICE CENELEC

MEDIU FIZIC	MODULAȚIE	DISTANȚĂ	VITEZĂ MAXIMĂ OBȚINUTĂ (KBPS)
JT	DQPSK	200 M	17,2
MT	DQPSK	6,4 KM	17,2
MT-JT	DBPSK	0,9+1,1 KM	8,64
JT-MT	ROBUST	1,1+0,9 KM	2,68

La testele de teren realizate într-o rețea electrică din Europa în banda de frecvențe 35,9 kHz – 90,6 kHz, s-au obținut rezultate promițătoare, după cum sunt prezentate în tabelul 2. Astfel se poate observa că s-au obținut viteze de comunicație de 17,2 kbps la transferul pe linia de JT pe o distanță de 200 m cu utilizarea modulației DQPSK și de 17,2 kbps la transferul pe linia de MT pe o distanță de 6,4 km cu utilizarea modulației DQPSK. La transferul de pe linia de MT pe linia de JT fără echipamente de traversare a transformatorului s-a obținut viteza de transfer de 8,64 kbps, cu utilizarea modulației DBPSK, iar la transferul de pe linia de JT pe linia de MT fără echipamente de traversare a transformatorului s-a obținut viteza de 2,68 kbps cu utilizarea modului Robust. La transferul de pe linia de JT pe linia de MT și invers au fost sesizate probleme de comunicație, cea mai mare performanță fiind posibilă doar pentru cazurile prezentate în tabelul 2 [15].

Aceeași echipă a companiei Maxim a prezentat la ediția din 2011 a ISPLC teste practice [16], realizate într-o rețea electrică din SUA, unde comunicația este permisă în banda FCC cu frecvențe cuprinse între 10 kHz și 490 kHz. Folosind specificațiile din suplimentul G3-FCC, au fost realizate teste practice pentru cele trei cazuri de comunicație, respectiv pe și între liniile electrice de JT și MT. Conform acestor noi specificații, se pot atinge viteze teoretice de transfer de până la 208 kbps, utilizând modulația D8PSK.

TABEL 3
REZULTATE TESTE PRACTICE FCC

MEDIU FIZIC	MODULAȚIE	DISTANȚĂ (KM)	VITEZĂ TRANSFER (KBPS)	NR. TRANSFORMAT OARE TRAVERSATE
MT	DBPSK	8	35	-
MT	D8PSK	8	>100	-
MT-JT	D8PSK	1,5	>50	1 - 2

La testele de teren realizate într-o rețea electrică din SUA în banda de frecvențe 10 kHz – 490 kHz, s-au obținut

rezultatele prezentate în tabelul 3. Conform tabelului 3 și explicațiilor date de autori se poate observa că la transferul pe linia de MT s-a obținut o rată de transfer de 35 kbps pe o distanță de 8 km la utilizarea DBPSK, iar la utilizarea D8PSK rata de transfer a crescut la peste 100 kbps pe aceeași distanță. La transferul de pe linia de MT pe cea de JT pe o distanță de 1,5 km prin transformator, nu a fost observată scăderea acestor rate de transfer raportată la această distanță. S-a mai observat că în locurile unde sunt puține ramificații ale rețelei și nivelul zgomotului este scăzut, comunicația PLC poate fi realizată și prin două transformatoare, fără ca viteza de transfer să fie afectată major, aceasta având valori de peste 50 kbps [16].

V. CONCLUZII

În această lucrare s-au prezentat tehnicile de comunicație utilizate la transferul de date prin rețeaua de alimentare cu energie electrică în bandă îngustă. S-au prezentat rezultatele obținute, în urma testărilor în teren și la simularea comunicației PLC, conform specificațiilor PRIME și PLC-G3 în [14]-[16]. Testele făcute pentru a verifica performanțele viitoare ale standardului IEEE P1901.2 arată posibilitatea comunicației pe liniile electrice de MT și JT la viteze semnificative, precum și posibilitatea traversării transformatorului dar la o viteză de transfer redusă. Testele practice realizate până în prezent arată posibilitatea traversării transformatorului folosind modul ROBUST, prezentat în specificațiile PLC-G3, la o distanță de 1 km de o parte și de alta a transformatorului în ambele sensuri în banda CENELEC. Pe de altă parte, arhitectura propusă de specificațiile PRIME este mai puțin complexă decât cea propusă de specificațiile PLC-G3. Cele două specificații demonstrează potențialul comunicației PLC prin liniile electrice de exterior de MT și JT, precum și prin corpul transformatorului, fapt care va duce desigur la îmbunătățirea modului de administrare și control al contoarelor electrice sau de alt gen.

Deoarece rețeaua electrică tinde să devină o rețea de comunicație bidirecțională de mare întindere și complexitate, vor apărea, fără îndoială, și unele dificultăți în ceea ce privește rutarea pachetelor prin nodurile acesteia, noduri amplasate pe linia de MT ce asigură comunicația cu diferite segmente ale liniei de MT și cu liniile de JT. Până în prezent, acest aspect nu este analizat încă, dar va constitui un element important în eficientizarea traficului și a consumului de energie a echipamentelor ce se vor ocupa strict de asigurarea comunicației.

Elementul definitor pentru reușita realizării structurii de comunicație doar prin rețeaua electrică îl constituie transformatorul. Acesta produce o atenuare semnificativă a semnalului de până la 50 dB, iar găsirea unei soluții fiabile, care să asigure comunicația prin acesta pe distanțe cât mai mari de o parte și de alta a lui, va reprezenta cheia reușitei implementării acestui sistem. Este important a se sublinia că,

până la G3 și PRIME, traversarea transformatorului se făcea cu echipamente speciale pentru comunicația pe linia de MT și cu soluții fără fir, care asigurau legătura dintre un centru de control și un concentrator amplasat pe partea de JT a transformatorului. Aceste standarde introduc o nouă posibilitate de transfer a datelor pe distanțe mari, asigurând trecerea semnalului PLC prin transformator.

Deoarece specificațiile PRIME și PLC-G3 oferă viteze de transfer asemănătoare, iar testele practice tind să certifice aceste viteze, veridicitatea acestora va fi testată în momentul implementării într-un sistem real cu un număr reprezentativ de contoare electrice la nivel metropolitan, unde necesitatea comunicației cu contoarele, evitarea coliziunilor și utilizarea multiplexării vor fi cei mai importanți factori în determinarea fiabilității soluției oferite de comunicația PLC.

MULȚUMIRI

Această lucrare a fost finanțată prin FONDUL SOCIAL EUROPEAN, proiect cofinanțat din Fondul Social European, prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013, Axa prioritară 1: „Educația și formarea profesională în sprijinul creșterii economice și dezvoltării societății bazate pe cunoaștere”, cu domeniul major de intervenție 1.5: „Programe doctorale și post-doctorale în sprijinul cercetării”, proiectul „Q-DOC- Creșterea calității studiilor doctorale în științe inginerești pentru sprijinirea dezvoltării societății bazate pe cunoaștere”, contract POSDRU/107/1.5/S/78534, acord de parteneriat nr. 24266/30.09.2010, având ca beneficiar Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca și ca partener Universitatea „Ștefan cel Mare” din Suceava.

REFERINȚE

- [1] H. C. Ferreira, L. Lampe, Power Line communications – Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines, Ed. Wiley, 2010.
- [2] Souha Souissi, Arwa Ben Dhia, OFDM modem design and implementation for narrowband powerline communication, DTIM, 2010
- [3] Asier Llano, Alberto Sendin, Quasi-synchronous Noise Interference Cancellation Techniques Applied in Low Voltage PLC, ISPLC, 2011
- [4] <http://grouper.ieee.org/groups/1901/>
- [5] <http://standards.ieee.org/news/2011/p19012.html>
- [6] <http://www.eurox10.com/Content/x10information.htm>
- [7] LonTalk Protocol Specification, v3, Echelon Corporation, 1994
- [8] http://www.weinzierl.de/download/references/KNX_Impl_E_2006_11_02.pdf
- [9] Open Meter, WP2/T2.1.3, D2.1 parte 4, STATE-OF-THE-ART TECHNOLOGIES & PROTOCOLS, 2009
- [10] Electricite Reseau Distribution France, PLC G3 Physical Layer Specification, Project PLC G3 OFDM, 2009.
- [11] <http://www.iberdrola.es/webibd/corporativa/iberdrola?IDPAG=ENWEBP ROVEEBASDOCCONT>
- [12] PRIME Alliance, Draft Standard for PowerLine Intelligent Metering Evolution, Version 1.3E, 2010.
- [13] <http://grouper.ieee.org/groups/1901/2/>
- [14] J. M. Domingo, S. Alexandres, PRIME performance in power line communication channel, ISPLC, 2011
- [15] K. Razazin, M. Umari, G3-PLC Specification for Powerline Communications: Overview, System Simulation and Field Trial Results, Internation Symposium on Power Line Communications, 2010.
- [16] Kaveh Razazian, Amir Kamalizad, G3-PLC Field Trials in U.S. Distribution Grid: Initial Results and Requirements, ISPLC, 2011.