

ظرفیت ارگادیک سیستم مخابره اطلاعات در بستر خطوط شبکه‌های توزیع نیروی برق با بکارگیری رله‌ی تقویت و ارسال

فائزه رجب‌زاده^۱ علی کوهستانی^۲ سید فریبرز زارعی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی قم - قم - ایران

rajabzadefaeze99@gmail.com

۲- استادیار - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی قم - قم - ایران

kuhestani@qut.ac.ir

۳- استادیار - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی قم - قم - ایران

zareei@qut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک سیستم مخابره اطلاعات در بستر خطوط برق (PLC) برای کاربرد شبکه‌های توزیع مطالعه می‌شود. برخلاف کاربرد معمول PLC در شبکه‌های فشار قوی، بکارگیری رله‌ها در شبکه توزیع به دلیل مسافت کانال طولانی‌تر و ساختار شبکه‌ای آن ضرورت دارد. بر این اساس، تعیین متوسط ظرفیت سیستم مخابراتی یا به اصطلاح ظرفیت ارگادیک، یک نیاز اساسی در بکارگیری و انتخاب سیستم PLC مناسب در شبکه‌های توزیع می‌باشد. ظرفیت یک سیستم مخابراتی، به عوامل مختلفی از جمله مشخصات کانال، پهنای باند و نویز موجود در شبکه بستگی دارد. در مقایسه با پژوهش‌های انجام‌شده در خصوص تعیین ظرفیت سیستم مخابراتی PLC، تاکنون مقاله‌ای به مطالعه یک سیستم PLC در حضور رله‌ی تقویت و ارسال و نیز نویز ضربه‌ای نپرداخته است. در این مقاله، با بکارگیری مدل‌های عملی کانال و نویز، ظرفیت ارگادیک به صورت تابعی از نسبت سیگنال به نویز سیگنال ورودی محاسبه می‌شود. در تحلیل‌های صورت گرفته شده، پارامترهای اثرگذار شامل توزیع آماری کانال، فاصله بین منبع و رله، فاصله بین رله و مقصد، توان سیگنال ارسالی و نسبت سیگنال به نویز ضربه‌ای لحاظ می‌شوند. در این راستا، نسبت سیگنال به نویز در گره مقصد با روابط ریاضی فرمول‌بندی شده و با استفاده از قضیه شانون، ظرفیت ارگادیک محاسبه می‌شود. بعلاوه، تأثیر میزان تخصیص توان بین منبع و رله، در مقدار ظرفیت ارگادیک بررسی شده است. در نهایت با شبیه‌سازی یک کانال نمونه، ظرفیت ارگادیک کانال به ازای مقادیر مختلف توان سیگنال ارسالی، نسبت سیگنال به نویز ضربه‌ای و طول کانال محاسبه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که نمودار ظرفیت متوسط با تلفات مسیر به طور خطی تغییر می‌کند؛ به طوری که برای $SNR=20$ dB و در حضور رله با کاهش طول خط از 200 m به 10 m، ظرفیت تقریباً به اندازه 3.5 bits/s/Hz افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مخابره اطلاعات در بستر خطوط برق، رله تقویت و ارسال، ظرفیت ارگادیک، کانال log-normal و نویز ضربه‌ای.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaeee.20.4.2501

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۱۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۳

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سید فریبرز زارعی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - قم - بلوار شهید خدا کرم (جاده قدیم تهران) - دانشگاه صنعتی قم - دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

فهرست علائم و اختصارات

علامت اختصاری	توضیحات
PLC	مخابره اطاعات در بستر خطوط قدرت
$\alpha(f)$	فاکتور تضعیف
$S(t)$	سیگنال وارد شده به کانال PLC
n_r	نویز اضافه شده در رله
σ_r^2	واریانس نویز اضافه شده در رله
G	بهره‌ی رله تقویت‌کننده
γ_r	سیگنال دریافتی در رله
n_d	نویز اضافه شده در مقصد (گیرنده) با واریانس σ_d^2
A	شاخص ضربه
$A(d_1, f)$	میزان تضعیف در پیوند گره فرستنده و رله
$A(d_2, f)$	تضعیف در پیوند گره رله و مقصد
$A_i(f, l_i)$	تضعیف خط قدرت
h_{rd}	بهره کانال بین گره رله و مقصد
h_{sr}	بهره کانال
$h(t)$	پاسخ ضربه کانال
$n(t)$	نویز کانال
B_c	پهنای باند همدوسی
A_2 و A_1	تضعیف در طول خط
SNR	نسبت توان سیگنال ورودی به نویز پس زمینه
SINR	نسبت توان سیگنال ورودی به نویز ضربه‌ای
AF	تقویت و ارسال
d_i/v_p	تاخیر هر یک از پژواک‌ها
$S(t)$	سیگنال وارد شده به کانال PLC
$h(t)$	پاسخ ضربه کانال PLC
$n(t)$	نویز کانال PLC
$R(t)$	سیگنال دریافتی از کانال PLC
a_0, a_1	پارامترهای تضعیف
v_p	سرعت فاز موج در خط قدرت
g_i	فاکتور وزن‌دهی
d_i	طول مسیر
P_s	توان سیگنال ارسالی از منبع
P_r	توان ارسالی از رله
s	سیگنال ارسالی از منبع
A_m	دامنه نویز گاوسی سفید
$\sigma_{gm}^2, \sigma_{im}^2$	واریانس نویز گاوسی سفید
n_{gm}	نویز گاوسی سفید در گره m
Γ	نسبت توان میانگین نویز گاوسی و ضربه‌ای
R'	مقاومت در واحد طول خط قدرت
G'	هدایت در واحد طول خط قدرت
Z_L	امپدانس مشخصه
k	فاکتور تضعیف
b_m	فرآیند برنولی

۱- مقدمه

فناوری مخابره اطاعات از طریق خطوط قدرت^۱ (PLC)، تاریخچه‌ای ۷۰ ساله دارد؛ و انتقال اولین داده‌ها، برای مدیریت بار شبکه و محافظت از نیروگاه‌ها و پست‌های فشار قوی بوده است. انتقال اطاعات در سیستم‌های قدرت، جهت نظارت بر شبکه‌ی انتقال، افزایش قابلیت اطمینان و بالابردن کیفیت کار و کاهش خطای سیستم یک امر ضروری است. در گام بعد، کاربرد سیستم‌های انتقال اطاعات در بهره‌برداری از شبکه برق‌رسانی، سیستم‌های خودکارسازی صنعتی و خانگی، اینترنت پرسرعت، سیستم‌های نظارت ویدئویی و زیرساخت اختصاصی شبکه هوشمند می‌باشد [۱].

سیستم‌های PLC از منظر طیف فرکانسی، به سه دسته تقسیم می‌شوند:

- انتقال داده در باند فوق باریک^۲ (UNB-PLC): این روش برای انتقال داده در مسافت‌های طولانی، با حداقل هزینه و نرخ داده‌ی بسیار پایین تا 60 bit/sec مناسب می‌باشد، و در باند فرکانسی 125-3000 Hz قرار گرفته است.
- انتقال داده در باند باریک^۳ (NB-PLC): فناوری NB-PLC برای انتقال داده نرخ پایین تا 500 bps در فرکانس پایین استانداردسازی شده است و در باند 3-500 kHz قرار دارد.
- انتقال داده در باند گسترده^۴ (BB-PLC): این روش از نرخ داده تا 100 Mbp پشتیبانی می‌کند و در محدوده فرکانسی 1.8-100 MHz قرار دارد.

شبکه‌ی هوشمند^۵ از مهم‌ترین نمونه کاربردهای PLC می‌باشد. با افزایش تقاضای منابع انرژی و نیاز به بهبود کارایی توان و کنترل آن، ارتقا و لزوم تجهیز شبکه به زیرساخت‌های قابل اطمینان مخابراتی ضرورت پیدا کرده است. شبکه‌ی برق‌رسانی کنونی دربرگیرنده‌ی مراکز انرژی است که با خطوط طولانی به یکدیگر متصل شده‌اند و تعامل محدود یک طرفه در جهت انتقال انرژی دارند. از سوی دیگر، شبکه‌ی هوشمند براساس تعریف سازمان انرژی ایالات متحده آمریکا، یک شبکه مدرن انرژی با ارتباطات دوطرفه‌ای از اطاعات و انرژی است که موجب کنترل دقیق مصرف، عرضه و تقاضا و بهینه‌سازی شبکه می‌شود.

تکنولوژی‌های متعددی جهت دستیابی به کنترل دقیق و اتوماسیون در شبکه‌های هوشمند وجود دارند. این تکنولوژی‌ها شامل تنظیم ولتاژ خودکار، سیستم‌های مدیریت انرژی، کنترل تولید خودکار، زیرساخت قرائت از راه دور^۶، زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته^۷ و مدیریت تقاضا می‌باشد. در این حوزه، راهکار مخابرات داده، موضوع بسیار مهمی در هوشمندسازی شبکه‌ی برق‌رسانی سنتی می‌باشد. عمده‌ترین روش‌های مخابراتی شامل فیبر نوری، مخابرات بی‌سیم و مخابره اطاعات در بستر خطوط برق است. به منظور توزیع بهینه و ارسال توان موثر، می‌بایست بهترین روش بر تمامی خطوط انتقال اعمال شود. در این راستا، فناوری PLC تمامی مزایای فناوری فیبرنوری و

فناوری‌های بی‌سیم مانند وای‌فای و وایمکس شامل انتقال سریع داده و دستاوردهای امنیتی را داراست. علاوه بر این، مهم‌ترین مزیت منحصر به فرد PLC، عدم نیاز به راه‌اندازی زیرساخت مخابراتی و در نتیجه هزینه نصب بسیار پایین و حفظ استقلال شرکت‌های برق است. هرچند ویژگی‌های تضعیف بالا، نویز قابل توجه و مشخصات محدودکننده کانال از معایب PLC است.

تنوع شبکه و گستردگی کاربردها در PLC، منجر به شکل‌گیری طیف وسیعی از مشخصات شده است که بسیاری از آن‌ها توسط سازمان‌های توسعه استاندارد پذیرفته شده‌اند. در مرجع [۲]، استانداردهای و مقررات وضع شده، بیان گردیده است. اعمال مقررات، به دلیل سازگاری با دیگر سیستم‌ها و همچنین برای جلوگیری از تداخل با سیستم‌های بی‌سیم در باند فرکانسی سیستم PLC می‌باشد.

کانال خطوط قدرت، به صورت فیلتر پایین گذر رفتار می‌کنند، و با افزایش فرکانس یا طول خط، میزان تضعیف سیگنال بسیار زیاد می‌شود. نتایج بدست آمده از مطالعات قبلی نشان می‌دهند که تغییرات وابسته به فرکانس تا مقدار 30 dB و تغییرات وابسته به زمان تا تقریباً 10 dB است [۳]. همچنین، در کاربردهایی که از فاصله‌ی پوشش‌دهی بیشتری برخوردار هستند، مخابره داده بین سطوح مختلف ولتاژی اهمیت خواهد داشت؛ که در آن داده‌های مخابراتی از ایستگاه‌های ترانسفورماتور عبور می‌کنند. ترانسفورماتورها، به عنوان فیلتر پایین گذر رفتار می‌کنند و برای انتقال داده در فرکانس بالا مناسب نیستند. به بیان دیگر، با عبور سیگنال در خطوط ولتاژ متوسط از ترانس دوم، تضعیف بسیار بالایی در حدود 55 dB تا 75 dB ایجاد می‌شود [۴]. یکی از راهکارهای غلبه بر تضعیف سیگنال، بکارگیری رله در کانال مخابراتی می‌باشد که پوشش ارتباطات را نیز افزایش می‌دهد [۵،۶]. در مقاله [۷] ایده‌ی انتقال اطلاعات و توان بصورت همزمان را در شبکه‌های حسگر بی‌سیم در حضور یک رله با یک باتری با قابلیت روش خاموش شدن را بررسی کرده‌اند. همچنین مرجع [۸] به بررسی تخصیص توان برای به حداقل رساندن احتمال خطای بیت در سیستم‌های ارتباطی هیبریدی، به‌ویژه سیستم‌های خط قدرت هیبریدی/بی‌سیم می‌پردازد.

از پژوهش‌های صورت گرفته در سال‌های اخیر می‌توان به ترانسفورماتورهای توزیع قدرت با رفتار فرکانس بالا اشاره نمود که با هدف غلبه بر تضعیف انجام شده است [۹،۱۰،۱۱]. همچنین، مرجع [۱۲] از جمله پژوهش‌هایی است که از رله برای کاهش محدودیت‌های توان ارسالی و تضعیف استفاده می‌کند. در این مطالعه، ظرفیت متوسط محرمانگی به عنوان تابعی از توان منبع در سیستم PLC مبتنی بر رله‌ی تقویت و ارسال^۸ در وضعیت‌های مختلف نشان داده شده است. همچنین، در این مقاله، برای واکاوی بهبود ظرفیت، سیستمی مرکب از ارتباط بی‌سیم و PLC را شبیه‌سازی کرده است. در مرجع [۱۳]، عملکرد یک سیستم PLC با رله‌ی کدگشا و ارسال^۹ بر مبنای

دسترسی چندگانه غیرمتعامد، مطالعه شده و این عملکرد، با معیار ظرفیت متوسط سنجیده شده است. در مرجع [۱۴] نیز عملکرد سیستم PLC در یک کانال دو طرفه و در حضور دو رله با عملکرد AF، مطالعه شده و با مدل یک رله مقایسه گردیده است. در این مقاله نشان داده شده است که مدل با دو رله، در ارتباطات غیرمستقیم عملکرد بهتری از سیستم با یک رله دارد. در مرجع [۱۴]، از تأثیر نویزهای PLC بر روی کارایی سیستم صرف‌نظر شده است. در کار اخیر [۱۵] نیز یک مسئله بهینه‌سازی طرح شده است که در آن احتمال خاموشی لینک ارتباطی مبتنی بر PLC و نیز رله DF، با بهینه‌سازی توأم مکان رله و توان ارسالی کمینه می‌شود. متذکر می‌شویم که رله AF در مقایسه با رله DF ساده‌تر و لذا ارزان‌تر بوده و بنابراین در صنعت بیشتر مورد توجه می‌باشد.

در مقایسه با پژوهش‌های انجام‌شده در خصوص تعیین ظرفیت سیستم مخابراتی PLC، تاکنون مقاله‌ای به مطالعه یک سیستم PLC در حضور رله‌ی AF و نیز نویز ضربه‌ای نپرداخته است. با توجه به این موضوع، نوآوری‌ها و تحقیقات ارائه شده در این مقاله، به شرح زیر هستند:

- با بکارگیری مدل‌های عملی کانال و نویز [۱۶]، نسبت سیگنال به نویز سیگنال ورودی محاسبه می‌شود. به طور خاص، مدل کانال آماری مبتنی بر مدل Zimmermann [۱۷] بوده که در آن تضعیف ناشی از انعکاس، خط قدرت و همچنین تاخیرهای احتمالی لحاظ می‌شود.
- در تحلیل‌های صورت گرفته شده، پارامترهای اثرگذار شامل فاصله بین منبع و رله، فاصله بین رله و مقصد، توان سیگنال ارسالی و نسبت سیگنال به نویز ضربه‌ای لحاظ می‌شوند.
- برای مدل سیستم مدنظر، نسبت سیگنال به نویز در گره مقصد با روابط ریاضی فرمول‌بندی شده و با استفاده از قضیه شانون، ظرفیت ارگادیک محاسبه می‌شود. در شبیه‌سازی‌ها، تأثیر تخصیص توان بین منبع و رله، در مقدار ظرفیت قابل حصول بررسی می‌شود.

با شبیه‌سازی یک کانال نمونه عملی، ظرفیت ارگادیک کانال به ازای مقادیر مختلف توان سیگنال ارسالی، نسبت سیگنال به نویز ضربه‌ای و طول کانال ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که نمودار ظرفیت متوسط با تلفات مسیر به طور خطی تغییر می‌کند؛ برای مثال، برای SNR=20 dB و در حضور رله AF، با کاهش طول خط از 200 m به 10 m، ظرفیت تقریباً به اندازه 3.5 bits/s/Hz افزایش می‌یابد.

مطالب این مقاله، در سه بخش عنوان می‌شود. در بخش ۲، به مشخصات کانال و انتقال داده در PLC پرداخته می‌شود. در این بخش، مدل‌سازی کانال مبتنی بر مدل آماری چندمسیره بوده، و مشخصات نویز و مدلسازی آن بررسی شده است. در ادامه، در بخش ۳، مدل سیستم حاوی رله‌ی AF توصیف شده و نسبت سیگنال به نویز (SNR) در گره مقصد محاسبه شده است. در بخش ۴، ظرفیت

از پویایی کانال PLC، و در نتیجه، تغییرپذیری با زمان ناشی می‌شود. محوشدگی فرکانس‌گزین، تغییرات میزان تضعیف بر حسب فرکانس در یک سیگنال مدوله تعریف می‌شود، و معمولاً به صورت فرآیند تصادفی مدل‌سازی می‌شود. محوشدگی فرکانس‌گزین، یکی از موارد محوشدگی چندمسیره است که با معیار پهنای باند هم‌دوسی B_c مشخص می‌شود. پهنای باند هم‌دوسی، محدوده‌ی فرکانسی است که در آن پاسخ فرکانسی کانال نسبتاً ثابت می‌باشد. اگر پهنای باند هم‌دوسی کانال از پهنای باند سیگنال کوچکتر باشد، در این صورت مولفه‌های سیگنال به طور نابرابر تضعیف خواهند شد و محوشدگی از نوع فرکانس‌گزین می‌باشد.

۲-۱- مدلسازی کانال

دو رویکرد اصلی برای مدلسازی تابع تبدیل کانال PLC وجود دارد: (۱) رویکرد آماری و (۲) رویکرد قطعی^{۱۱}. هر دو رویکرد مورد استفاده بوده و در پژوهش‌های سال‌های اخیر بارها دنبال شده‌اند. رویکردهای آماری با متوسط‌گیری نتایج حاصل از چندین بار اندازه‌گیری حاصل می‌شوند؛ و در رویکرد قطعی، کانال براساس تئوری خط انتقال مدلسازی می‌شود.

در مدل آماری، کانال خطوط قدرت با این فرض مدلسازی می‌شوند که غالباً تحت تأثیر پدیده چند مسیره باشند. همان طور که پیش‌تر گفته شد، پدیده چندمسیره در کانال PLC، به دلیل انشعاب‌های متعدد و عدم تطبیق امپدانس است، که نوسانات و پژواک سیگنال را به همراه دارد.

در این مقاله، مدل کانال آماری بر پایه‌ی مدل پیشنهادی توسط Zimmermann بررسی می‌شود. در این مدل، تضعیف ناشی از انعکاس، خط قدرت و همچنین تاخیرهای احتمالی در نظر گرفته شده است؛ که از رابطه‌ی (۲) حاصل می‌شود [۱۷].

$$H(f) = \sum_{i=0}^{N-1} g_i e^{-\alpha(f)d_i} e^{-j2\pi f \frac{d_i}{v_p}} \quad (2)$$

که در آن g_i فاکتور وزن‌دهی است که حاصل ضرایب بازتاب و انتقال در مسیر i می‌باشد. d_i طول مسیر و v_p سرعت فاز موج در خط قدرت است. d_i / v_p تأخیر هریک از پژواک‌هاست. همچنین، عبارت $e^{-\alpha(f)d_i}$ تضعیف بوده، که در آن $\alpha(f)$ فاکتور تضعیف است. فاکتور تضعیف از آزمایشات تجربی بدست می‌آید، و می‌توان آن را به صورت تقریبی از رابطه (۳) بدست آورد [۱۷].

$$\alpha(f) = \frac{R'}{2Z_L} + \frac{G'Z_L}{2} \approx a_0 + a_1 f^k \quad (3)$$

با توجه به معادله (۳)، مقدار فاکتور تضعیف، به المان‌های خط وابسته است که شامل: R' مقاومت در واحد طول، Z_L امپدانس مشخصه و

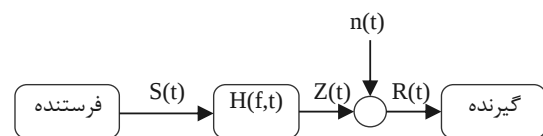
ارگادیک مدل پیشنهادی شبیه‌سازی شده، و عملکرد سیستم ارزیابی می‌شود. در پایان، نتایج مطالعه‌ی این مقاله در بخش ۵ خلاصه شده است.

۲- مشخصات کانال

به طور کلی، سیستم مخابراتی PLC را می‌توان به صورت شکل (۱) مدل کرد. این مدل، متشکل از فرستنده PLC، کانال PLC، نویز و گیرنده است. سیگنال دریافتی، مطابق معادله (۱) می‌باشد.

$$R(t) = S(t) * h(t) + n(t) \quad (1)$$

در این معادله، $S(t)$ سیگنال وارد شده به کانال PLC، $h(t)$ پاسخ ضربه کانال و $n(t)$ نویز کانال می‌باشد. مطابق رابطه (۱)، سیگنال ارسالی از فرستنده، در پاسخ فرکانسی کانال ضرب شده و پس از جمع شدن با نویزها دریافت می‌شود.



شکل (۱): مدل پایه‌ای سیستم PLC

از خصوصیات کانال PLC، رفتار فیلتر پایین‌گذر، تضعیف چندمسیره وابسته به فرکانس، نویز غیرگاووسی، پاسخ فرکانسی خطی و تغییرپذیر با زمان و بارهای نامنتطبق است.

محیط انتقال PLC یک کانال پراکنده‌ساز^{۱۲} است. در یک کانال پراکنده‌ساز، ثابت فاز تابعی خطی از فرکانس زاویه‌ای نیست؛ و امواج با مؤلفه‌های فرکانسی مختلف با سرعت‌های فاز متفاوت حرکت می‌کنند. در نتیجه، اعوجاج در سیگنال و پدیده‌ی چند مسیری رخ می‌دهد. علت رخداد پدیده چند مسیری در PLC به دلیل وجود شاخه‌های متعدد و بارهای نامنتطبق است؛ و سیگنال نهایی از برهم‌نهی چندین نسخه‌ی تاخیر یافته و با دامنه متفاوت سیگنال ارسالی بدست می‌آید. ویژگی تغییرپذیری با زمان از قطع و وصل اتصال دستگاه‌ها به شبکه برق ناشی می‌شود، که در نتیجه‌ی آن اتصالات شبکه تغییر می‌کند. برای کاهش اثرات مخرب بر کانال PLC، روش‌های پیشرفته پردازش سیگنال و کدگذاری کانال اعمال می‌شود.

از ملاحظات طراحی سیستم، موقعیت فرستنده و گیرنده است که در میزان نرخ خطای ارسالی موثر است. برای مثال، یک گیرنده در مجاورت منبع نویز، موجب کاهش نسبت سیگنال به نویز خواهد شد. لازم به ذکر است که وسیله الکتریکی متصل به شبکه را می‌توان منبع نویز به شمار آورد [۱۶].

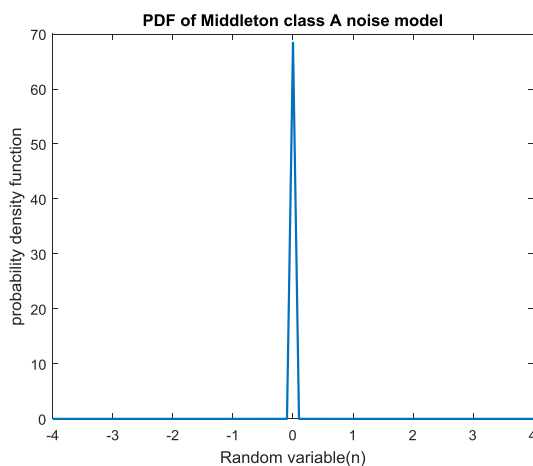
با مشاهده تغییرات تضعیف سیگنال در حوزه‌ی زمان و فرکانس، دیده می‌شود که شکاف‌هایی در برخی فرکانس‌ها وجود دارد. این شکاف‌ها، به دلیل پدیده‌ی محوشدگی فرکانس‌گزین در کانال است؛ و

پارامتر A ، به اصطلاح شاخص ضربه، نامیده می‌شود. هرچه A کمتر باشد نویز ضربه‌ای‌تر است، و اگر به بینهایت میل کند به توزیع گاوسی نزدیک می‌شود. واریانس میدلتون از رابطه (۵) بدست می‌آید [۳].

$$\sigma_m^2 = \sigma^2 \frac{m}{1+\Gamma} = \sigma_i^2 \frac{m}{A} + \sigma_g^2 \quad (5)$$

در این رابطه، Γ نسبت توان میانگین نویز گاوسی و ضربه‌ای است، که برابر است با $\Gamma = \sigma_g^2 / \sigma_i^2$. همچنین، توان نویز کل برابر با $\sigma^2 = \sigma_g^2 + \sigma_i^2$ می‌باشد.

در شکل (۲)، تابع چگالی احتمال نویز میدلتون کلاس A نشان داده شده است. در این نمودار، شاخص ضربه $A=0.01$ و $\Gamma=100$ در نظر گرفته شده است.

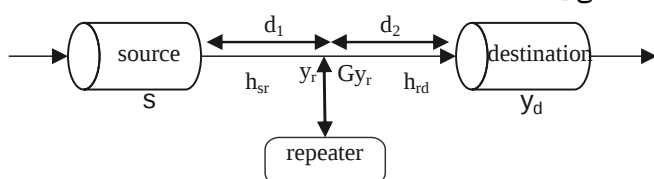


شکل (۲): تابع چگالی احتمال نویز ضربه ای میدلتون [۲]

۳- مدلسازی سیستم پیشنهادی

شکل (۳)، مدل سیستم در نظر گرفته شده در این مطالعه را نشان می‌دهد، که شامل یک منبع و یک رله و یک مقصد است. در اینجا شبکه خط قدرت مشابه ساختار باس است که گره رله، به عنوان مشترک، به خط ارتباطی باس متصل شده است.

با توجه به شکل (۳)، سیگنال ارسالی s ، در مسیر منبع-رله از کانال با بهره h_{sr} عبور کرده، و در گره رله با نویز n_r جمع می‌شود. سپس، در مسیر رله-مقصد از کانال با بهره h_{rd} عبور می‌کند، و با نویز n_d در گیرنده جمع می‌شود. در این سیستم، اثرات تضعیف خط قدرت در عبارت $A_i(f, l_i)$ در نظر گرفته می‌شود، که به صورت نمایی با فاصله افزایش می‌یابد و مطابق رابطه $\exp(-(a_0 + a_1 f^k) d_i)$ بدست می‌آید.



شکل (۳): مدل سیستم PLC پیشنهادی با رله AF

G' هدایت در واحد طول خط قدرت می‌باشند. در این رابطه، مقادیر مقاومت و هدایت به دلیل پدیده‌ی اثر پوستی با افزایش فرکانس نسبت به مقدار پایه‌ی آنها در فرکانس 50 Hz به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. همچنین، مقدار امپدانس مدل کننده‌ی رفتار مغناطیسی خط در فرکانس مورد نظر می‌باشد، که تابعی از فرکانس کاری می‌باشد و به صورت خطی با آن افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن این موارد، برای یک خط با آرایش و ساختار فیزیکی مفروض، فاکتور تضعیف می‌تواند به صورت تابعی از فرکانس، تقریب زده شود. این تقریب در عبارت سمت راست معادله (۳) آورده شده است. همچنین a_0 و a_1 پارامترهای تضعیف (با یکای m^{-1}) بوده و k بیانگر فاکتور تضعیف می‌باشد که مقادیر معمول آن بین ۰.۵ تا ۱ است. این پارامترها برای یک نوع مفروض از سیم/کابل خطوط توزیع برق، مقادیر ثابتی دارند.

۲-۲- مدلسازی نویز

نویز در خطوط قدرت را می‌توان به دو دسته کلی (۱)- نویز پس‌زمینه و (۲)- نویز ضربه‌ای تقسیم کرد. نویز پس‌زمینه ناشی از تجهیزات الکترونیکی در مراکز مسکونی و تداخلات با ایستگاه‌های پخش همگانی می‌باشد. با وجود اینکه نویز پس‌زمینه ذاتاً متغیر با زمان است، به دلیل تغییرات بسیار آهسته در طول دوره چند دقیقه‌ای یا حتی چند ساعته می‌تواند ایستا در نظر گرفته شود؛ و به صورت نویز گاوسی جمع شونده مدلسازی می‌شود [۱۸].

نویز ضربه‌ای به دو دسته متناوب همزمان با فرکانس شبکه و ناهمزمان با فرکانس شبکه تقسیم می‌شود. نویز همزمان، معمولاً از یکسوسازهای کنترل شده سیلیکونی در منابع تغذیه توان ایجاد می‌شود و با فرکانس 50/100 Hz همزمان است [۱۷]. نویز ناهمزمان، مخرب‌ترین نویز در شبکه‌ی انتقال داده است و با عمل سوئیچینگ منابع تغذیه توان در تجهیزات الکترونیکی و حالت گذرای قطع و وصل وسایل الکترونیکی ایجاد می‌شود. توجه شود که نویز ضربه‌ای را نمی‌توان ایستا در نظر گرفت، چرا که توان بسیار بالایی دارد و می‌تواند موجب افزایش قابل توجهی در نرخ خطا شود [۱۸].

یکی از مدل‌های مهم برای نویز غیرگاوسی، مدل میدلتون است [۳]. در توزیع میدلتون، فرض بر آن است که تعداد زیادی تداخلات مستقل از لحاظ آماری در نویز دخیل هستند. در این مدل، نویز به سه بخش کلاس A، کلاس B و کلاس C تقسیم می‌شود. در این میان، نویز کلاس A برای مدلسازی نویز PLC استفاده می‌شود. دامنه نویز پس‌زمینه و نویز ضربه‌ای دارای تابع چگالی احتمال مطابق رابطه (۴) است [۳].

$$P_n(n) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{e^{-A} A^m}{m!} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} \cdot \exp\left(\frac{-n^2}{2\sigma_m^2}\right) \quad (4)$$

در رابطه (۱۱)، s سیگنال ارسالی از منبع است و توان آن $E[s^2]$ برابر با یک در نظر گرفته شده است. P_s توان سیگنال ارسالی است که با ضرب شدن جذر آن مقدار توان را افزایش می‌دهد. $A(d_1, f)$ میزان تضعیف در پیوند گره فرستنده و رله است. n_r نویز اضافه شده در رله با واریانس σ_r^2 است.

حال سیگنال دریافتی در گره مقصد، به صورت معادله (۱۲) نوشته می‌شود.

$$y_d = G y_r A(d_2, f) h_{rd} + n_d \quad (12)$$

در معادله (۱۲)، G بهره‌ی رله تقویت‌کننده است که در سیگنال دریافتی در رله y_r ضرب شده است. همچنین، $A(d_2, f)$ تضعیف در پیوند گره رله و مقصد، h_{rd} بهره کانال بین گره رله و مقصد و n_d نویز اضافه شده در مقصد با واریانس σ_d^2 است. بنابراین رابطه بهره رله، براساس معادله (۱۰) مطابق معادله (۱۳) است.

$$G = \left[\frac{P_r}{P_s (A(d_1, f))^2 |h_{sr}|^2 + \sigma_r^2} \right]^{1/2} \quad (13)$$

اگر عبارت سیگنال دریافتی در مقصد، به فرم گسترده نوشته شود، قسمت‌های سیگنال و نویز را می‌توان مطابق رابطه (۱۴) تفکیک نمود.

$$y_d = \underbrace{\sqrt{P_s} A(d_1, f) A(d_2, f) h_{rd} h_{sr} G s}_{\text{Signal part}} + \underbrace{n_r A(d_2, f) h_{rd} G + n_d}_{\text{noise part}} \quad (14)$$

توجه به این نکته حائز اهمیت است که متوسط نویز گاوسی جمع‌شونده صفر است؛ و لذا واریانس نویز برابر با توان آن است. همچنین، نسبت توان سیگنال ورودی به نویز پس زمینه (SNR) و نسبت توان سیگنال ورودی به نویز ضربه‌ای (SINR)، به صورت رابطه (۱۵) نوشته می‌شود.

$$\begin{aligned} SNR &= 10 \log_{10} (P_{in} / \sigma_{gm}^2) \\ SINR &= 10 \log_{10} (P_{in} / \sigma_{im}^2) \end{aligned} \quad (15)$$

با استفاده از روابط (۱۴) و (۱۵)، نسبت سیگنال به نویز در گره مقصد مطابق رابطه (۱۶) نوشته می‌شود.

$$\gamma_d = \frac{P_s A(d_1, f) A(d_2, f) |h_{sr}|^2 |h_{rd}|^2 G^2}{\sigma_r^2 A(d_2, f) |h_{rd}|^2 G^2 + \sigma_d^2} \quad (16)$$

پس از جایگذاری مقادیر بهره طبق رابطه (۱۳)، واریانس نویز و عبارت تضعیف به ترتیب مطابق رابطه (۱۵) و (۱۷) خواهند بود.

$$\begin{aligned} \gamma_d &= \frac{P_s A_1 A_2 |h_{sr}|^2 |h_{rd}|^2}{A_2 |h_{rd}|^2 + P_s A_1 |h_{sr}|^2 + \left(\frac{1}{SNR} + \frac{1}{SINR} \right)} \\ &\quad \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{SNR} + \frac{1}{SINR} \right)} \end{aligned} \quad (17)$$

در میان مدل‌های پذیرفته شده برای کانال، توزیع log-normal متناسب با آمار بهره کانال در سناریوهای مختلف است. این مدل در بسیاری از پژوهش‌های اخیر برای تجزیه و تحلیل عملکرد سیستم‌های PLC به کار رفته است [۲۰، ۱۹]. تابع چگالی احتمال توزیع log-normal با پارامترهای μ و σ به صورت معادله (۶) است [۱۹].

$$f(h_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i} h_i} \exp \left[\frac{-(\ln(h_i) - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2} \right] \quad (6)$$

با توجه به دسته‌بندی نویز PLC در بخش ۲-۲، نویز سفید گاوسی مختلط در مدل سیستم بکار گرفته استفاده می‌شود. همچنین نویز ضربه‌ای در نظر گرفته می‌شود که می‌توان آن را با تقریب خوبی به صورت فرآیند تصادفی گاوسی-برنولی مدل کرد. بنابراین مجموع نویز اضافه شده به سیستم در گره m ، به صورت معادله (۷) نوشته می‌شود.

$$n_{plm} = n_{gm} + n_{im} \quad (7)$$

گره m شامل s و r در شکل (۳) می‌باشد. نویز گاوسی سفید در گره m با میانگین صفر و واریانس σ_{gm}^2 بوده، و $n_{im} = b_m A_m$ نویز ضربه‌ای با فرم کلی از مدل گاوسی دوجمله‌ای است. از اینرو، A_m نویز گاوسی سفید با میانگین صفر و واریانس σ_{im}^2 است، و b_m فرآیند برنولی با تابع جرم احتمال معادله (۸) است [۱۲].

$$\begin{aligned} p_r(b_m = 1) &= p_m \\ p_r(b_m = 0) &= 1 - p_m \end{aligned} \quad (8)$$

در ادامه، به رله و سیگنال‌های دریافتی در مدل شکل (۳) پرداخته می‌شود. در این مقاله، رله‌ی تقویت و ارسال (AF) که ساختاری ساده‌تر و هزینه‌ی کمتری دارد در نظر گرفته شده است. رله AF به دو صورت، (۱) تقویت با بهره ثابت و (۲) تقویت با توان خروجی ثابت عمل می‌کند. بسیاری از رله‌ها، براساس توان خروجی ثابت تقویت را انجام می‌دهند، زیرا محدودیت‌های سخت افزاری سبب می‌شود که یک تقویت کننده، توان خروجی معین داشته باشد. لذا در این مورد، بهره رله با توان سیگنال ورودی تنظیم می‌شود.

برای رله با بهره G ، سیگنال خروجی حاصل ضرب سیگنال ورودی در ضریب بهره مطابق معادله (۹) است.

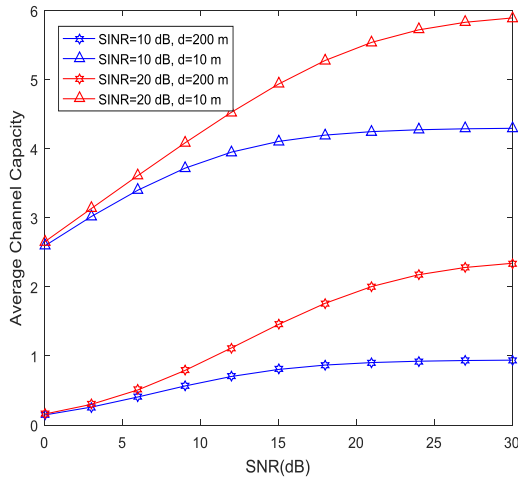
$$y = G x \quad (9)$$

با توجه به اینکه سیگنال ورودی و خروجی، متغیر تصادفی هستند، رابطه توان از متوسط گیری ($E[\cdot]$) توان دوم طرفین محاسبه می‌شود. رابطه (۱۰) این نکته را نشان می‌دهد.

$$E[y^2] = G^2 E[x^2] \rightarrow P_y = G^2 P_x \quad (10)$$

در مدل سیستم شکل (۳)، سیگنال دریافتی در رله (y_r)، مطابق رابطه (۱۱) است.

$$y_r = \sqrt{P_s} A(d_1, f) h_{sr} s + n_r \quad (11)$$

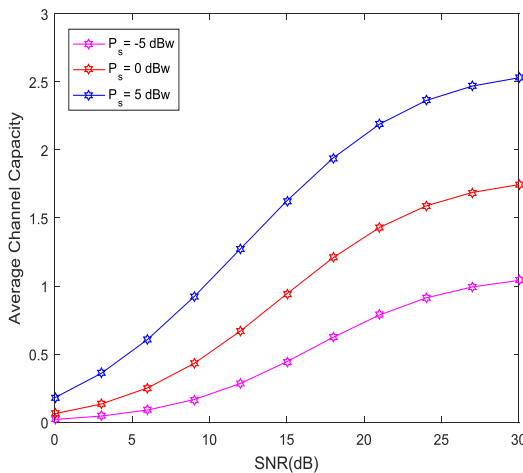


شکل (۴): نمودار ظرفیت متوسط به صورت تابعی از نسبت سیگنال به نویز ورودی و بررسی تغییرات نسبت به SINR و مسافت

همان طور که در نمودار (۴) ملاحظه می‌شود، با کاهش نسبت سیگنال به نویز ضربه‌ای، متوسط ظرفیت کانال کاهش یافته است، بنابراین روش‌های کاهش نویز ضربه‌ای در جهت افزایش میزان SINR بسیار اهمیت دارد. لازم به ذکر است در این نمودار، توان نویز ضربه‌ای پایین در نظر گرفته شده است و لذا مقدار SINR زیاد است.

همچنین نمودار ظرفیت متوسط با تلفات مسیر به طور خطی تغییر می‌کند. یعنی با کاهش طول خط، به دلیل اینکه تلفات کم شده است، ظرفیت بهبود چشمگیری دارد و این مقدار افزایش، به صورت خطی است. برای مثال، در نمودارهای قرمز رنگ در $SNR=20$ dB، بهره‌ی ظرفیت تقریباً برابر با 3.5 bits/s/Hz را نتیجه می‌دهد.

شکل (۵) نمودار ظرفیت متوسط برحسب SNR به ازای سه مقدار توان سیگنال ارسالی از منبع (P_s) را نشان می‌دهد. طول خط در هر دو لینک برابر با 200 m و نیز $SINR=20$ dB در نظر گرفته شده است.



شکل (۵): نمودار ظرفیت متوسط به صورت تابعی از نسبت سیگنال به نویز ورودی و بررسی تغییرات به ازای توان سیگنال ارسالی

P_s توان سیگنال ارسالی از منبع، A_1 و A_2 تضعیف در طول خط و پارامترهای SNR و SINR به ترتیب نسبت سیگنال ورودی به نویز و نسبت سیگنال ورودی به نویز ضربه‌ای است.

متوسط حداکثر نرخ داده ارسالی یا ظرفیت ارگادیک سیستم، براساس قضیه شانون و مطابق معادله‌ی (۱۸) برابر است با [۱۲]:

$$C = \frac{1}{2} \cdot \log_2(1 + \gamma_d) \text{ (bits / s / Hz)} \quad (18)$$

که در آن ضریب γ_d به دلیل وجود رله در مسیر است که به موجب آن، یک پیام دو بار در کانال ارسال شده و در نتیجه، کارایی استفاده از کانال نصف می‌شود.

می‌توان روندنمای روش پیشنهادی در این مقاله را مطابق شکل *** به تصویر کشید.

۴- شبیه‌سازی و تفسیر نتایج

در این بخش، متوسط ظرفیت سیستم مورد نظر، شبیه‌سازی می‌شود. با توجه به رابطه (۱۷) و (۱۸)، می‌توان ظرفیت ارگادیک را برای سیستم مورد نظر محاسبه نمود. به عبارت دقیق‌تر، برای پیاده‌سازی طرح پیشنهادی در این مقاله، از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده می‌شود. بدین صورت که برای یک توپولوژی معین از سیستم (متعاقباً تعیین d_1 و d_2)، به تعداد زیاد (در اینجا صد هزار) نمونه از متغیرهای تصادفی log-normal برای تولید کانال‌های h_{sr} و h_{rd} تولید می‌کنیم. سپس این مقادیر را در γ_d دریافتی در مقصد، یعنی رابطه (۱۷) وارد می‌نمائیم. با قرار دادن این γ_d ها در رابطه ظرفیت (۱۸) و سپس با متوسط‌گیری بر روی آنها، ظرفیت ارگادیک سیستم حاصل می‌شود.

بهره کانال در هر دو لینک منبع-تا-رله و رله-تا-مقصد، توزیع log-normal با پارامترهای $\mu = 0$ و $\sigma = 2$ dB در نظر گرفته شده است.

در جدول (۱)، پارامترهای تضعیف a_0 و a_1 که در (۳)، از تقریب فاکتور تضعیف حاصل می‌شوند، برای دو مقدار طول خط 10 m و 200 m آورده شده است [۱۷].

جدول (۱): پارامترهای تضعیف در طول خط

d(m)	g_1	$a_0(m^{-1})$	$a_1(s/m)$	K
10	1	-2.03×10^{-3}	3.75×10^{-7}	0.7
200	1	9.33×10^{-3}	3.24×10^{-7}	0.7

در شکل (۴)، نمودارهای ظرفیت ارگادیک برحسب SNR ورودی رسم شده است. این نمودارها به ازای دو مقدار $SINR=10$ dB و $SINR=20$ dB و دو مقدار طول خط مطابق جدول (۱) است. مقدار توان سیگنال ورودی $P_s = 3$ (W) فرض شده است.

استفاده از قضیه شانون محاسبه و شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل شده از شبیه‌سازی‌ها بیان می‌کردند که هرچه SNR و SINR زیاد شود، ظرفیت ارگادیک افزایش می‌یابد. همچنین نشان داده شد که یکی از عوامل تأثیرگذار بر تلفات یک سیستم مخابراتی مبتنی بر PLC، طول خط است که با کاهش آن از 200 m به 10 m، ظرفیت ارگادیک افزایش قابل توجهی دارد، که این موضوع اهمیت بکارگیری رله در سیستم‌های مبتنی بر PLC را نشان می‌دهد. در نهایت با در نظر گرفتن یک مجموع ثابت توان برای گره‌های منبع و رله، مسئله تأثیر تخصیص توان بررسی گردید. نتایج شبیه‌سازی بیان کردند که توزیع بهینه توان کل بین منبع و رله، ظرفیت ارگادیک را بهبود می‌دهد.

در این بخش، برخی کارهای پژوهشی جهت مطالعات آینده ذکر می‌شود. همان‌طور که ذکر گردید مرجع [۸] به بررسی تخصیص توان برای به حداقل رساندن احتمال خطای بیت در سیستم‌های ارتباطی هیبریدی متشکل از PLC و بی‌سیم می‌پردازد. پیشنهاد می‌شود نقش و تأثیر رله در این گونه سیستم‌های هیبریدی مطالعه گردد.

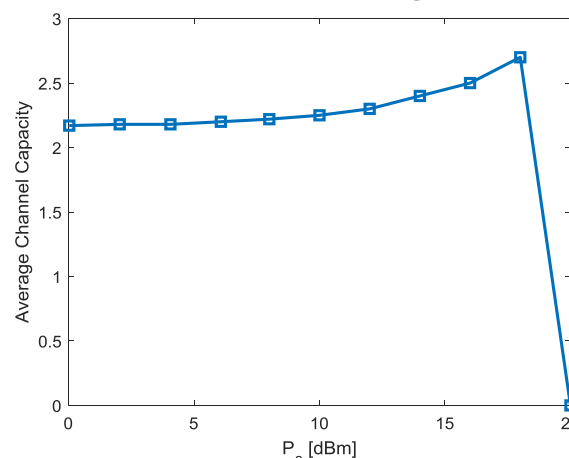
همچنین به دلیل ماهیت پخشی سیگنال، ارتباطات PLC در برابر شنود اطلاعات آسیب‌پذیر است. به طور سنتی، کلیدهای مخفی توسط کلیدهای از پیش به اشتراک گذاشته شده یا الگوریتم رمزگذاری نامتقارن، تولید/توزیع می‌شوند. همه این روش‌ها با مشکلاتی مانند پیچیدگی محاسباتی بالا، هزینه بالا یا امنیت کمتر مواجه هستند. برای حل این مشکل، یک طرح تولید کلید مخفی^{۱۲} مبتنی بر امنیت لایه فیزیکی^{۱۳} برای یک شبکه PLC پهن باند خانگی در مقاله [۲۱] پیشنهاد شده است. پیشنهاد می‌شود یک طرح تولید کلید مخفی برای ارتباطات رله‌ای نیز پیشنهاد و ارزیابی شود.

محققان در مرجع [۲۲] به بررسی امنیت لایه فیزیکی در PLC پرداخته‌اند. در سیستم مدل مورد مطالعه، شنودگران همدست، امنیت سیستم را تهدید می‌کنند؛ شنودگرانی که نزدیک یا دور از مکان فرستنده مستقر شده‌اند. خوب است تأثیر رله را نرخ محرمانه قابل حصول در چنین سیستم مدلی بررسی گردد.

مراجع

- [۱] شیخ حسینی، "سیر تکاملی مخابرات خطوط قدرت: از یک سیستم تلفن ثابت تا فناوری مخابراتی شبکه هوشمند انرژی"، فصلنامه آموزش مهندسی ایران، شماره ۸۰، ۹۶-۷۱، اسفندماه ۹۷.
- [2] C. Cano, A. Pittolo, D. Malone, L. Lampe; A. Tonello, A. Dabak, "State of the Art in Power Line Communications: From the Applications to the Medium" IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 34, pp. 1935-1952, July 2016.
- [3] H. C. Ferreira, L. Lampe, J. Newbury and Th. G. Swart, "Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines," John Wiley & Sons, 2010.
- [4] L. T. Berger, A. Schwager, and J. J. E. Garzás, "Power Line Communications for Smart Grid Applications," Journal of Electrical and Computer Engineering, Hindawi Publishing Corporation, Dec. 2012.

با توجه به شکل (۵)، افزایش SNR با متوسط ظرفیت رابطه‌ی مستقیم دارد و همچنین با افزایش P_s ، ظرفیت کانال بهبود یافته است. حال به منظور مشاهده تأثیر حضور رله در یک سیستم مخابراتی مبتنی بر PLC، بر روی یک مسئله تخصیص توان تمرکز می‌کنیم. فرض کنید مجموع توان ارسال از منبع (P_s) و توان ارسال از رله (P_r) برابر با P_t باشد. به عبارت دیگر $P_s + P_r = P_t$. حال در نظر می‌گیریم $P_t = 20$ dBm و نیز برای دیگر پارامترهای سیستم: $G=2$ ، $\text{SNR}=20$ dB، $\text{SINR}=15$ dB و $d_1 = d_2 = 200$ (m). نمودار حاصل شده در شکل (۶)، ظرفیت ارگادیک سیستم را برحسب P_s ، از 0 dBm تا 20 dBm نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود توزیع توان بصورت کارآمد بین گره‌های منبع و رله، ظرفیت ارگادیک قابل حصول را بهبود می‌دهد. مثلاً برای پارامترهای ذکر شده، مطابق شکل (۶) می‌بینیم که بهترین نرخ داده در $P_s = 18$ dBm حاصل می‌گردد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که تابع ظرفیت در ابتدا رفتاری صعودی و سپس نزولی دارد به‌طوری که در $P_s = 20$ dBm، مقدار ظرفیت ارگادیک صفر می‌شود. این مشاهده بیان می‌کند که تخصیص بیشتر توان به منبع، ظرفیت ارگادیک را بهبود می‌دهد؛ ولی از یک مقدار بیشتر (در اینجا حدود 18 dBm)، این ظرفیت کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش، اهمیت نقش رله در مخابره داده می‌باشد؛ به طوری که برای $P_s = 20$ dBm، توان اختصاصی به رله صفر شده و متعاقباً مخابره متوقف می‌گردد.



شکل (۶): نمودار ظرفیت ارگادیک برحسب توان منبع هنگامی که کل توان بین منبع و رله برابر با 20 dBm باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در شبکه‌های توزیع برخلاف شبکه‌های فشار قوی، به دلیل تضعیف بالای سیگنال ناشی از مسافت طولانی کانال، استفاده از رله‌های AF ضرورت دارد. در این مقاله، به متوسط ظرفیت یک سیستم PLC در حضور یک رله AF پرداخته شده است. در سیستم مدل مورد مطالعه، کانال مبتنی بر انتشار چندمسیره سیگنال بوده و نویز ضربه‌ای نیز در گیرنده‌ها، تجربه می‌شود. برای چنین مدل سیستمی، نسبت سیگنال به نویز در گره مقصد، محاسبه گردید. سپس ظرفیت ارگادیک آن با

- [20] S. Galli, "A simplified model for the indoor power line channel," in 2009 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, 2009, pp. 13-19.
- [21] J. Zhang, X. Liu, Y. Cui and D. Xu, "Physical-Layer Secret Key Generation in Power Line Communication Networks," IEEE Access, vol. 10, pp. 48539-48550, May 2022.
- [22] A. Camponogara, R. D. Souza and M. V. Ribeiro, "The Effective Secrecy Throughput of a Broadband Power Line Communication System Under the Presence of Colluding Wireless Eavesdroppers," IEEE Access, vol. 10, pp. 85019-85029, Aug. 2022.
- [5] سمانه دزفولی زاده، زهرا مبینی، "استراق سمع فعال با کمک UAV برای بهبود امنیت شبکه‌های مخابرات مشارکتی" نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۸، شماره ۳، ۱۴۳-۱۵۱، ۱۴۰۰.
- [۶] محسن نصری، محمد جواد صابر، سید محمد سجاد صدوق، محمد ترابی، "ارزیابی عملکرد محرمانگی شبکه رله‌ای بافردار رادیوشناختی در کانال های محوشدگی رایلی" نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۶، شماره ۴، ۱۱۳-۱۲۱، ۱۳۹۸.
- [7] H.S. Nguyen, L. Sevcik, H.-P. Van, "Performance Analysis on Low-Power Energy Harvesting Wireless Sensors Eco-Friendly Networks with a Novel Relay Selection Scheme," Electronics, vol.11, no.13, pp.1978, 2022.
- [8] M. L. Filomeno, M. L. R. Campos, H. V. Poor and M. V. Ribeiro, "Hybrid Power Line/Wireless Systems: Power Allocation for Minimizing the Average Bit Error Probability," IEEE Transactions on Communications, vol. 70, no. 2, pp. 810-821, Feb. 2022.
- [9] O. Ozgonenel, D. W. P. Thomas, S. U. Ercan, "Power Line Communication Through Distribution Transformers in Smart Grid", in 40th International Conference on Telecommunications and signal processing (TSP), IEEE, Oct. 2017.
- [10] S. U. Ercan, O. Ozgonenel, D. W. P. Thomas, "Power Line Communication Channel for Smart Grid", in 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG), IEEE, 2018.
- [11] A. Cataliotti, V. Cosentino, D. D. Cara, G. Tinè, "Simulation of a power line communication system in medium and low voltage distribution networks," in 2011 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), pp. 28-30, Sept. 2011.
- [12] A. Salem, K. A. Hamdi, E. Alsusa, "Physical Layer Security Over Correlated Log-Normal Cooperative Power Line Communication Channels," IEEE Access, vol.5, pp. 13909-13921, July 2017.
- [13] K. M. Rabie, B. Adebisi, H. G. Yousif, H. Gacanin, A. M. Tonello, "A Comparison between Orthogonal and Non-Orthogonal Multiple Access in Cooperative Relaying Power Line Communication Systems", IEEE Access, vol.5, pp. 10118-10129, May 2017.
- [14] A. G. Liong, L. Gopal, C. Chiong, Y. Rong, "Channel Characteristics Comparison of Single-Relay and Two-Relay Two-way PLC Systems", IEEE Int. Conf on computing, communication and networking technologies (ICCCNT), India, July 2020.
- [15] G. Prasad and D. Mishra, "Energy-Aware Outage Probability Minimization in DF-Relayed Power Line Communication," IEEE Networking Letters, vol. 3, no. 1, pp. 23-26, Mar. 2021.
- [16] A. Majumder and J. Caffery, "Power Line Communications: An Overview," IEEE Potentials, Oct. 2014.
- [17] M. Zimmermann and K. Dostert, "A Multipath Model for the Powerline Channel", IEEE Transactions on Communications, vol. 50, no. 4, Apr. 2002.
- [18] L.D Bert, P. Caldera, D. Schwingshackl, and A.M. Tonello, "On Noise Modeling for Power Line Communications," in 2011 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, IEEE, Apr. 2011.
- [19] C. Abou-Rjeily, "Performance analysis of power line communication systems with diversity combining under correlated lognormal fading and Nakagami noise", IET Communications, vol. 11, no. 3. pp. 405-413, Feb. 2017.

زیر نویس ها

- ¹ Power Line Communication
² Ultra-Narrow-Band PLC
³ Narrow-Band PLC
⁴ Broad-Band PLC
⁵ Smart Grid
⁶ Automatic Meter Reading (AMR)
⁷ Automatic Meter Infrastructure
⁸ Amplify-and-Forward
⁹ Decode-and-Forward
¹⁰ Dispersive
¹¹ Deterministic Approach
¹² Secret Key Generation
¹³ Physical Layer Security