دانشگاه فردوسی مشهد
دانشکده مهندسی، گروه برق - الکترونیک

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در مهندسی برق- الکترونیک

تقویت کننده‌ی کلاس E پربازده با شبکه بار جدید

نگارش:

مسعود یاوری فروشانی

استاد راهنما:

دکتر ساسان ناصح

بهمن‌ماه ۱۳۹۰

تقدیم به

پدر و مادرم

تعهدنامه

اینجانب **مسعود یاوری فروشانی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق - الکترونیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد نویسنده پایان نامه«**تقویت کننده‌ی کلاس *E* پربازده با شبکه بار جدید**» تحت راهنمایی دکتر ساسان ناصح متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه فردوسی مشهد» و یا « *Ferdowsi University of Mashhad* » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

بسمه تعالی

مشخصات رساله/پایان نامه تحصیلی دانشجویان

دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان رساله/پایان نامه: تقویت کننده‌ی کلاس E پربازده با شبکه بار جدید

(High Efficiency Class-E Power Amplifier with a New Load Network)

نام نویسنده: مسعود یاوری فروشانی

نام استادراهنما: دکتر ساسان ناصح

دانشکده: مهندسی	**گروه**: برق	**رشته تحصیلی**: الکترونیک
تاریخ تصویب: / / **۱۳**		**تاریخ دفاع:**۱۳۹۰/۱۱/۱۵
مقطع تحصیلی:کارشناسی ارشد ●	دکتری ○	**تعداد صفحات:**۱۰۸

چکیده پایان نامه:

تقویت کننده‌های قدرت بعنوان بخش جدایی ناپذیر از سیستم‌های مخابراتی، بخش اعظم توان مصرفی این سیتم‌ها را به خود اختصاص می‌دهند. بنابراین افزایش بازدهی تقویت کننده‌ها توجه طراحان مدارات RF و مایکروویو را بخود جلب کرده است. یکی از پرکاربردترین راه حل‌ها، استفاده از تقویت کننده‌های قدرت سوئیچ شونده، بویژه تقویت کننده‌ی کلاس E می‌باشد. تقویت کننده‌ی قدرت کلاس E از شرایط ولتاژ و مشتق ولتاژ سوئیچ شدن صفر برای اطمینان از سوئیچ شدن نرم ترانزیستور و عملکرد بهینه‌ی تقویت کننده بهره می‌گیرد. از لحاظ تئوری، در صورت ایده‌آل بودن تمام افزاره‌ها، بازدهی ۱۰۰٪ ازین تقویت تقویت کننده قابل حصول است. اگرچه در عمل، بدلیل وجود عوامل غیر ایده‌آلی مانند مقاومت حالت روشن غیر صفر ترانزیستور و زمان سوئیچ شدن غیر صفر ترانزیستور، این بازدهی غیر قابل دسترس می‌شود. چشمپوشی از عوامل غیر ایده‌آلی در طراحی و ساخت تقویت کننده‌ی قدرت کلاس E باعث عملکرد غیر بهینه و حتی عدم عملکرد مدار تقویت کننده می‌شود.

یکی از المان‌های پارازیتی که تأثیر مخربی روی مدارات فرکانس بالا دارد، اندوکتانس پارازیتی ناشی از سیم اتصال زمین پد به پایه‌ی بسته‌بندی مدارات مجتمع می‌باشد.

در این کار، تأثیر این اندوکتانس بر عملکرد تقویت کننده‌ی کلاس E در فناوری CMOS بررسی شده است.

همچنین، شبکه بار جدیدی برای تقویت کننده‌ی کلاس E پیشنهاد شده است. این ساختار به تقویت کننده امکان استفاده از مقاومت بار و خازن موازی بزرگتر را می‌دهد و ظرفیت توان تقویت کننده را افزایش می‌دهد. افزایش مقاومت بار به افزایش بازدهی توقیت کننده کمک می‌کند و افزایش خازن موازی امکان افزایش فرکانس کاری برای یک افزاره‌ی فعال مشخص را فراهم می‌کند. همچنین، مقدار هارمونیک موجود روی مدار رزونانس کاهش یافته که امکان استفاده از ضریب کیفیت‌های پایین‌تردر مقایسه با ساختار ابتدایی کلاس E امکان پذیر می‌سازد.

کلید واژه:

۱. تقویت کننده‌ی قدرت

۲. سوئیچ شونده

۳. کلاس E

۴. بازدهی توان افزوده

امضای استاد راهنما:

تاریخ: / /**۱۳۹۰**

تشکر و قدردانی

در ابتدا مراتب تشکر خود را تقدیم استاد راهنمای خود، جناب دکتر ساسان ناصح، بخاطر راهنمایی‌ها، صبر و تشویق بی دریغ ایشان می‌کنم. اصرار ایشان بر بهترین بودن، برای همیشه چراغی در زندگی شخصی و تخصصی بنده خواهد بود. همچنین از دکتر میمندی نژاد و دکتر طاهرزاده ثانی بخاطر وقتی که برای بازبینی این متن قرار دادند تشکر ویژه‌ای می‌شود.

این سال‌ها در مشهد برای بنده بیشترین تجربیات الهام بخش را به همراه داشته است. آموزه‌های دکتر لطفی، دکتر کشمیری، دکتر مافی نژاد، دکتر میمندی نژاد در این دوره‌ی تحصیلی انگیزه‌ی زیادی در بنده ایجاد کرده و منبعی از الهام باقی خواهند ماند.

از تمامی دانشجویان کارشناسی ارشد الکترونیک دانشکده، بویژه همکلاسی‌های خود، بخاطر کمک‌های بی دریغ در امور علمی و شخصی نهایت سپاس را دارم. این دوستان با فراهم آوردن جمعی دوستانه، روزهای فراموش نشدنی در دفتر ذهن بنده به جای گذاشتند. همچنین از کلیه‌ی دانشجویان ساکن خوابگاه فجر دانشگاه فردوسی که مصاحبت با ایشان نقطه‌ی روشنی در زندگی بنده بوده و خواهد بود تشکر می‌کنم.

در آخر ولی نه کمتر، از خانواده‌ی خود که با فداکاری و تشویق مقدمات طی مدارج علمی را برای بنده فراهم ساختند سپاسگذاری می‌کنم، هر چند که تشکر از ایشان در کلمات نگنجد.

چکیده

رشد روز افزون فناوری بی سیم همراه و در خواست ها برای سیستم‌هایی با عمر باطری بیشتر توجهات را به سوی طراحی‌هایی با مصرف توان کمتر جلب کرده است. در این بین تقویت کننده‌های قدرت بدلیل مصرف توان زیاد نیاز به طراحی دقیقی دارند. تلاش های زیادی برای افزایش بازدهی تقویت کننده‌های قدرت چه در سطح مداری و چه در سطح سیستمی صورت گرفته است. در سطح مداری، یکی از پرکاربردترین روش ها استفاده تقویت کننده‌های قدرت سوئیچ شونده، بویژه تقویت کننده‌های کلاس E می‌باشد. در تقویت کننده‌ی کلاس E بدلیل بهره گیری از شرایط سوئیچ شوندگی نرم و عدم انطباق ولتاژ و جریان المان فعال، بازدهی ۱۰۰٪ در تئوری قابل حصول است. البته، عوامل غیر ایده‌آل مربوط به افزاره‌ی فعال همچون مقاومت حالت روشن غیر صفر، زمان گذار روشن به خاموش غیر صفر و اندوکتانس پارازیتی، و همچنین ضریب کیفیت محدود المانهای غیر فعال باعث تنزل بازدهی آن‌ها می شوند. در نظر نگرفتن عوامل پارازیتیکی در طراحی تقویت کننده‌ی کلاس E می‌تواند به عملکرد بد تقویت کننده یا خرابی آن منجر شود. بنابراین نیاز به بررسی دقیق تأثیر چنین المان‌های داریم.

توان خروجی و فرکانس کاری تقویت کننده‌های قدرت، همچنین، دو مشخصه‌ی اصلی از تقویت کننده‌های قدرت را شامل می‌شوند. برای حصول توان‌های بالا از تقویت کننده‌ی کلاس E نیاز به استفاده از مقاومت‌های بار کوچک و یا ولتاژ تغذیه‌ی بالا می‌شود، که اولی باعث افزایش تلفات افزاره‌ی فعال و شبکه‌ی تطبیق خروجی و دومی باعث افزایش ولتاژ استرس بر روی افزاره‌ی فعال می شود. خازن خروجی ترانزیستورها عامل محدودیت فرکانس کاری تقویت‌کننده کلاس E در فرکانس‌های بالا می‌باشد که مقدار خازن بهینه موازی با این خازن قابل مقایسه می‌شود.

یکی از المان‌های پارازیتی که تأثیر مخربی روی مدارات فرکانس بالا دارد، اندوکتانس پارازیتی ناشی ناشی از سیم اتصال زمین پد به پایه‌ی بسته‌بندی مدارات مجتمع می‌باشد. در این کار، تأثیر این اندوکتانس بر عملکرد تقویت کننده‌ی کلاس E در فناوری $CMOS$ بررسی شده است.

همچنین، شبکه بار جدیدی برای تقویت کننده‌ی کلاس E پیشنهاد شده است. این ساختار به تقویت کننده امکان استفاده از مقاومت بار و خازن موازی بزرگتر را می‌دهد و ظرفیت توان تقویت کننده را افزایش می‌دهد. افزایش مقاومت بار به افزایش بازدهی توقیت کننده کمک می‌کند و افزایش خازن موازی امکان افزایش فرکانس کاری برای یک افزاره‌ی فعال مشخص را فراهم می‌کند. همچنین، مقدار هارمونیک موجود روی مدار رزونانس کاهش یافته که امکان استفاده از ضریب کیفیت‌های پایین‌تردر مقایسه با ساختار ابتدایی کلاس E امکان پذیر می‌سازد.

فهرست مطالب

پیشگفتار ۱

فصل اول مبانی تقویت کننده های قدرت ۷

۱-۱ مقدمه ۷

۱-۲ بازدهی و ظرفیت توان ۸

۱-۳ مکانیزم های تلفات توان تقویت کننده ۱۰

۱-۳-۱ تلفات توان مربوط به راه انداز ۱۱

۱-۳-۲ تلفات افزاره های فعال ۱۱

۱-۳-۳ تلفات شبکه ی خروجی ۱۳

۱-۴ خطی بودن ۱۳

۱-۵ تقویت کننده های قدرت ۱۴

۱-۵-۱ تقویت کننده های قدرت هدایت انتقالی ۱۵

۱-۵-۲ تقویت کننده های قدرت سوئیچ شونده ۲۴

۱-۶ نتیجه گیری ۲۷

فصل دوم تقویت کننده های قدرت کلاس E ۲۹

۲-۱ مقدمه ۲۹

۲-۲ تحلیل ابتدایی تقویت کننده ی کلاس E ۳۰

۲-۳ تأثیر عوامل غیر ایده آل ۳۵

۲-۳-۱ عوامل غیر ایده آلی مربوط به افزاره های فعال ۳۶

۲-۳-۲ تأثیر اندوکتانس سیم اتصال زمین بر روی عملکرد تقویت کننده کلاس E ۴۰

۲-۳-۳ پارازیتیک های القاکننده ها ۵۳

۲-۴ محدودیات تقویت کننده ی کلاس E ۵۶

۲-۵ شبکه بار بهبود یافته برای تقویت کننده ی کلاس E ۵۷

۲-۵-۱ تقویت کننده ی کلاس E با القاکننده ی تغذیه ی محدود ۵۷

۲-۵-۲ تقویت کننده ی کلاس E با شبکه تشدید تنظیم شده ی سری و موازی ۶۱

۲-۶ ساختارهای دیگر از تقویت کننده ی کلاس E ۶۲

۲-۶-۱ تقویت کننده ی کلاس E پوش-پول ۶۲
۲-۶-۲ تقویت کننده ی کلاس E کسکد ۶۴
۲-۷ تقویت کننده ی قدرت کلاس E معکوس ۶۵
۲-۸ تقویت کننده ی کلاس E در فناوری CMOS ۶۶
۲-۹ کنترل توان خروجی ۶۹
۲-۱۰ نتیجه گیری ۷۱

فصل سوم تقویت کننده ی قدرت کلاس E با شبکه بار جدید ۷۳

۳-۱ مقدمه ۷۳
۳-۲ ساختار تقویت کننده ی کلاس E پیشنهادی ۷۴
۳-۲-۱ تحلیل تقویت کننده ی کلاس E پیشنهادی ۷۵
۳-۲-۲ استرس افزاره ی فعال ۸۵
۳-۲-۳ پارامترها و عملکرد مداری ۸۶
۳-۳ شبیه سازی ۹۱
۳-۴ پهنای باند و هارمونیک های خروجی ۹۵
۳-۵ نتیجه گیری ۹۸

نتیجه گیری و پیشنهادها ۱۰۱

منابع ۱۰۵

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱ شمایی از تقویت کننده ی قدرت و توان های ورودی و خروجی آن. ۸
شکل ۱-۲ مدل ساده ای از افزاره ی فعال با صرف نظر ازالمان های پارازیتیکی فیدبک. ۱۲
شکل ۱-۳ ساختار ساده ای از یک تقویت کننده ی هدایت انتقالی. ۱۵
شکل ۱-۴ ولتاژ و جریان تقویت کننده ی کلاس A ایده آل. ۱۷
شکل ۱-۵ تغییرات اندازه ی هارمونیک های موجود در جریان درین ترانزیستور تقویت کننده ی قدرت هدایت انتقالی نسبت به زاویه ی هدایت ترانزیستور. ۱۹

شکل ۱-۶ بیشینه توان خروجی و بازدهی قابل دسترس از تقویت کننده قدرت هدایت انتقالی..... ۲۰
شکل ۱-۷ تغییرات ظرفیت توان خروجی تقویت کننده های هدایت انتقالی نسبت به زاویه ی هدایت..... ۲۱
شکل ۱-۸ تقویت کننده ی کلاس F با تشدید کننده های کنترل هارمونیک ۲۲
شکل ۱-۹ مؤلفه های فرکانسی تقویت کننده ی کلاس F با کنترل هارمونیک سوم ۲۳
شکل ۱-۱۰ ساختار یک تقویت کننده ی کلاس D بهمراه شکل موج ولتاژ و جریان ترانزیستور NMOS. ۲۶
شکل ۲-۱ ساختار تقویت کننده ی کلاس E..... ۳۱
شکل ۲-۲ ولتاژ های مدار تقویت کننده ی کلاس E ۳۳
شکل ۲-۳ ولتاژ درین ترانزیستور در حضور خازن موازی خطی و غیر خطی ۴۰
شکل ۲-۴ تقویت کننده ی کلاس E در حضور اندوکتانس سورس ۴۲
شکل ۲-۵ تغییرات X_S نسبت به X_P، توان خروجی برابر ۱ وات، ولتاژ تغذیه برابر ۱ ولت ۴۶
شکل ۲-۶ بیشینه ی ولتاژ درین، در زمان خاموش (خط ممتد) و روشن (خط چین) بودن سوئیچ ۴۸
شکل ۲-۷ ولتاژ های شبیه سازی شده ی تقویت کننده ی کلاس E شبه ایده آل. (الف) L_B=1NH ، (ب) L_B=0NH.
..... ۵۱
شکل ۲-۸ ولتاژهای شبیه سازی شده ی تقویت کننده ی کلاس E در فناوری . CMOS (الف) L_B=1NH ، (ب) L_B=0NH..... ۵۳
شکل ۲-۹ تقویت کننده ی کلاس E با القا کننده ی تغذیه ی محدود ۵۸
شکل ۲-۱۰ المان های طراحی K بر حسب تغییرات Q برای چرخه وظیفه های ۰.۴، ۰.۵ و ۰.۶ ..... ۶۰
شکل ۲-۱۱ تقویت کننده ی کلاس E با شبکه تشدید تنظیم شده ی سری و موازی ۶۱
شکل ۲-۱۲ تقویت کننده ی کلاس E پوش-پول..... ۶۳
شکل ۲-۱۳ ولتاژهای تقویت کننده ی کلاس E پوش-پول..... ۶۳
شکل ۲-۱۴ ساختار تقویت کننده ی کلاس E کسکد و شکل موج ولتاژ درین ترانزیستورها. ۶۴
شکل ۲-۱۵ ساختار تقویت کننده ی کلاس E معکوس. ۶۵
شکل ۲-۱۶ بازدهی تقویت کننده های قدرت کلاس E ساخته شده در فناوری های مختلف ۶۸

شکل ۲-۱۷ روشهای کنترل توان (الف) از طریق کنترل ولتاژ تغذیه (ب) از طریق کنترل سیگنال گیت ترانزیستور کسکد. ۷۰

شکل ۳-۱ ساختار تقویت کننده ی کلاس E پیشنهادی. ۷۴

شکل ۳-۲ تغییرات سوسپتانس موازی با A و B ، V_{DC}=1V، P_{OUT}=1W. ۸۶

شکل ۳-۳ تغییرات مقاوت بار با A و B ، V_{DC}=1V، P_{OUT}=1W. ۸۷

شکل ۳-۴ تغییرات راکتانس سری با A و B، V_{DC}=1V، P_{OUT}=1W. ۸۸

شکل ۳-۵ تغییرات نرمال شده ی بیشینه ی ولتاژ درین با A و B. ۸۹

شکل ۳-۶ تغییرات نرمال شده ی بیشینه ی جریان درین با A و B. ۹۰

شکل ۳-۷ تغییرات ظرفیت توان خروجی با A و B. ۹۰

شکل ۳-۸ ولتاژ چند گره از تقویت کننده ی پیشنهادی و جریان ترانزیستور آن برای ترکیبات مختلفی از A و B بترتیب برابر (الف)۱.۶ و ۰.۸، (ب) ۱.۳ و ۰.۹۸، (ج) ۱.۸ و ۰.۷ و (د) ۱.۸ و ۱.۵. ..... ۹۱

شکل ۳-۹ تقویت کننده ی کلاس E ابتدایی بهمراه شبکه های تطبیق ورودی خروجی. ۹۲

شکل ۳-۱۰ ولتاژهای درین و گیت تقویت کننده های کلاس E ابتدایی و پیشنهادی (طراحی اول). ۹۴

شکل ۳-۱۱ تغییرات توان خروجی و بازدهی توان افزوده تقویت کننده های کلاس E ابتدایی و پیشنهادی (طراحی اول) نسبت به ولتاژ تغذیه. ۹۵

شکل ۳-۱۲ تغییرات توان خروجی و بازدهی توان افزودهی تقویت کننده های کلاس E ابتدایی و پیشنهادی (طراحی اول) نسبت به فرکانس کاری. ۹۶

شکل ۳-۱۳ سطح هارمونیک های ولتاژ اعمالی به فیلتر سری تقویت کننده های کلاس E ابتدایی و پیشنهادی (طراحی اول). ۹۷

شکل ۳-۱۴ تغییرات توان خروجی و بازدهی توان افزوده ی طراحی های چهارم و پنجم تقویت کننده ی کلاس E پیشنهادی نسبت به فرکانس کاری. ۹۸

شکل ۳-۱۵ سطح هارمونیک های خروجی تقویت کننده های کلاس E ابتدایی و پیشنهادی (طراحی پنجم). ۹۸

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱ مقایسه ی تقویت کننده های قدرت. ۲۸

جدول ۲-۱ روابط طراحی شبکه بار خروجی تقویت کننده ی قدرت کلاس E.....۳۵

جدول ۲-۲ مشخصات تقویت کننده ی قدرت کلاس E شب ایده آل در حضور و بدون حضور اندوکتانس سورس. ۵۰

جدول ۲-۳ مشخصات تقویت کننده ی قدرت کلاس E در فناوری CMOS در حضور و بدون حضور اندوکتانس سورس. ۵۲

جدول ۳-۱ مشخصات و المان های چندین طراحی از تقویت کننده ی پیشنهادی و تقویت کننده ی کلاس E ابتدایی ۹۳

پیشگفتار

فناوری بی سیم در حال رشد و با کاربردهای زیادی می‌باشد که هر روزه بر مصارف آن افزوده می-شود. علاوه بر کاربردهای سنتی در مخابرات همچون رادیو تلویزیون، فرکانس رادیویی و مایکروویو در تلفن‌های بی سیم، مخابرات بی سیم، شبکه‌های محلی و سیستم‌های مخابراتی شخصی به کار بسته می-شوند. پیش بینی می‌شود که همین نرخ رشد فناوری RF در آینده نیز ادامه پیدا کند.

توان سیگنال دریافتی در گیرنده طبق رابطه‌ی انتقال *فریز*[1] بصورت زیر بیان می‌شود:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \qquad (1)$$

که در آن P_t توان سیگنال ارسالی، G_t و G_r به ترتیب بهره‌ی فرستنده و گیرنده، λ طول موج و R طول کانال می‌باشد. واضح است که برای افزایش توان سیگنال دریافتی توسط گیرنده و در نتیجه افزایش نسبت سیگنال به نویز، توان سیگنال ارسالی باید به مقدار قابل قبولی برسد. این عمل بوسیله‌ی تقویت کننده‌های قدرت صورت می‌پذیرد. این مقدار توان از چند صد میلی وات برای سیستم‌های همراه تا چندین وات برای ایستگاه‌های ثابت تغییر می‌کند [۱].

تقویت کننده‌های قدرت علاوه بر کاربردهای مخابراتی، در رادارها، افزاره‌های الکترونیکی نظامی، گرم کننده‌ها و تصویر برداری مایکرو ویو پزشکی نقش ایفا می‌کنند.

یکی از مشکلاتی که مصرف کنندگان سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم با آن روبرو هستند، عمر محدود باطری‌ها می‌باشد که به نوبه‌ی خود زمان کارکرد یا "زمان مکالمه" را مشخص می‌کند. یک راه حل برای افزایش زمان کارکرد سیستم، استفاده از باطری‌هایی بادوام‌تر می‌باشد که ناخواسته وزن و

[1] *Friis Transmission Equation*

قیمت سیستم قابل حمل را بالا می‌برد. همچنین برای افزایش طول عمر باطری‌ها، می‌توان توان مصرفی سیستم را کاهش داد. از آنجایی که تقویت کننده‌ی قدرت بخش قابل توجهی از توان مصرفی فرستنده‌ها را به خود اختصاص داده، بازار بی سیم تقاضا را برای تقویت کننده‌هایی با بازدهی بالاتر و در نتیجه عمر باطری طولانی‌تر افزایش داده است. برای مثال یک تلفن همراه را در نظر می‌گیریم که توان خروجی تقریبی برابر ۱ وات دارد. با فرض اینکه این تقویت کننده ۵۰٪ توان ورودی خود را به توان خروجی تبدیل کند، در چنین سیستمی ۱ وات توان مصرفی فقط به تقویت کننده‌ی قدرت اختصاص داده شده است که بخش اعظمی از توان مصرفی تلفن همراه را شامل می‌شود. همچنین ایستگاه‌های ثابت مخابراتی و فرستنده‌های پر قدرت رادیویی دیگر به بازدهی بالای تقویت کننده‌های قدرت برای افزایش اطمینان پذیری و کاهش هزینه خنک کننده‌ها نیاز دارند. بنابراین چالش برانگیزترین بخش طراحی تقویت کننده-های قدرت، بیشینه کردن بازدهی آن می‌باشد.

تلاش‌های زیادی برای افزایش بازدهی طبقه‌ی قدرت، چه در سطح سیستمی و چه در سطح مداری صورت گرفته است. از دید سیستمی، رفتار دینامیکی سیگنال ورودی به تقویت کننده و مدولاسیون آن، جنبه‌های کلیدی کار هستند که به خاطر نقش اساسی آن در انتخاب راهکار مناسب برای افزایش بازدهی، باید مورد توجه قرار گیرند.

در سطح مداری، یکی از جذابترین و پرکاربردترین راه حل‌ها، غالباً در فرکانس‌های رادیویی پایین، توسط تقویت کننده‌های قدرت تنظیم شده‌ی سوییچ شونده[1] بیان می‌شود. چندین پیشنهاد در این زمینه ارائه شده اند که همگی بر این فرض استوارند که افزاره‌های فعال در طبقه‌ی قدرت به عنوان سوئیچ ایده-آل روشن/خاموش عمل می‌کند. استفاده از سوئیچ برای تقویت توان از برهم نهی ولتاژ و جریان افزاره‌های فعال بعنوان پرمصرف‌ترین بخش تقویت کننده جلوگیری می‌کند که در تئوری، بازدهی ۱۰۰٪ را نتیجه می‌دهد. اگرچه گستره‌ی بزرگی از تقویت کننده‌های قدرت سوئیچ شونده از قبیل کلاس D، کلاس S و

[1] *Switched-mode Tuned Power Amplifier*

انواع دیگر پیشرفت داده شده اند، در این بین تقویت کننده‌ی کلاس E بدلیل بهره‌گیری از سوئیچ شدن نرم و طراحی ساده دست بالاتری نسبت به انواع تقویت کننده‌های سوئیچ شونده دارد.

اولین پیشنهادات برای افزایش بازدهی با استفاده از افزاره‌ی فعال به عنوان سوئیچ در اواخر ۱۹۶۰ ارائه شد. متأسفانه چنین مقالاتی به زبان روسی و بدون ترجمه‌ی انگلیسی ارائه شدند و بنابراین بگونه‌ای مؤثر توسط محققین بکار گرفته نشدند. کمی بعد *سُکال*[1] کلاس جدیدی از تقویت کننده‌ی سوئیچ شونده را، به نام تقویت کننده‌های کلاس E معرفی و به عنوان اختراع ثبت کرد. بر خلاف تقویت کننده‌های هدایت انتقالی[2] که افزاره‌ی فعال به عنوان منبع جریان کنترل شده با سیگنال ورودی عمل می‌کنند (برای مثال تقویت کننده‌های قدرت کلاس AB و C)، در تقویت کننده‌های قدرت سوئیچ شونده، افزاره‌ی فعال به شکلی ایدآل در دو حالت روشن یا خاموش قرار می‌گیرد، بنابراین رفتاری شدیداً غیر خطی از خود نشان می‌دهند. این رفتار غیر خطی، زمانی که با مدولاسیون پوش ثابت سر و کار داریم، مشکل به حساب نمی‌آیند. در مقابل زمانی که با سیگنال مدوله شده‌ی دامنه سر و کار داریم که به غیر خطی بودن تقویت کننده حساس می‌باشند، رویکردهای دیگری برای خطی سازی تقویت کننده ارائه می‌شوند. در این بین، روش حذف و بازسازی پوش می‌تواند عیب غیر خطی بودن تقویت کننده را در کنار حفظ بازدهی بالای تقویت کننده مرتفع نماید.

با توجه به این که فرضیاتِ ما بر کارکرد افزاره‌های فعال به عنوان سوئیچ استوار است، پیکربندی و کارایی موثر چنین ساختارهایی عمیقاً به چنین فرضی وابسته است. این بدین معناست که کارایی مورد نظر بصورت بازدهی بالا ناشی از رفتار سوئیچ شوندگی افزاره‌ی فعال، معمولاً به یک دامنه‌ی فرکانسی محدود می‌شود که تأثیر عناصر پارازیتیکی المان، قابل چشم پوشی هستند. در فرکانس‌های بالاتر (فرکانس هایی در محدوده‌ی مایروویو)، افزاره‌های فعال قادر به عبور سریع از ناحیه‌ی خطی و بروز رفتار سوئیچ شونگی نیستند، بنابراین نیاز به احتساب رفتار سوئیچ در ناحیه‌ی خطی در طراحی‌ها و شبیه-سازی‌ها می‌باشد.

[1] *Nothan O. Sokal*
[2] *Transconductance Amplifier*

همچنین افزاره‌های فعال از خود مقاومت حالت روشن محدود، زمان سوئیچ شدن محدود و اندوکتانس پارازیتیکی نشان می‌دهند که به کاهش بازدهی تقویت کننده‌ی کلاس E می‌انجامند. همچنین در فرکانس‌های بالا که خازن خروجی افزاره‌ی فعال قابل مقایسه با خازن موازی بهینه‌ی تقویت کننده‌ی کلاس E می‌شود، این خازن محدود کننده‌ی فرکانس است. از طرفی خازن غیر خطی خروجی ترانزیستور می‌تواند سبب افزایش ولتاژ استرس ترانزیستور شود که به کاهش اعتمادپذیری ترانزیستور می‌انجامد. در نظر نگرفتن عوامل پارازیتیکی در طراحی تقویت کننده‌ی کلاس E می‌تواند به عملکرد بد تقویت کننده یا خرابی آن منجر شود. بنابراین نیاز به بررسی دقیق تأثیر چنین المان‌های داریم.

اندوکتانس پارازیتیکی مربوط به سیم اتصال زمین که زمین مدار را از روی تراشه به پایه‌های بسته بندی متصل می‌کند یکی دیگر از المان‌های پارازیتیکی می‌باشد که می‌تواند تأثیرات ناخواسته‌ای بر عملکرد مدارات RF داشته باشد. این المان نه تنها کارکرد مدار را دچار اختلال می‌کند، بلکه باعث نوسان ولتاژ بدنه‌ی تراشه می‌شود که می‌تواند بر روی مدارات آنالوگ حساس مجتمع شده روی همان تراشه تأثیر بگذارد. در این کار تأثیر این این المان بر روی عمکرد تقویت کننده‌ی کلاس E بررسی شده است.

توان خروجی و فرکانس کاری تقویت کننده‌های قدرت، همچنین، دو مشخصه‌ی اصلی از تقویت کننده‌های قدرت را تشکیل می‌دهند. برای حصول توان‌های بالا از تقویت کننده‌ی کلاس E، نیاز به استفاده از مقاومت‌های بار کوچک و یا ولتاژ تغذیه‌ی بالا می‌باشد، که اولی باعث افزایش تلفات ترانزیستور و شبکه‌ی تطبیق خروجی و دومی باعث افزایش ولتاژ استرس ترانزیستور می‌شود.

فناوری‌های جدیدی چون *GaAs HBTs* ، *GaN HEMTs* و *InP double HBTs (DHBTs)* بدلیل برخورداری از مقاومت حالت روشن کم، ولتاژ شکست بالا و خازن موازی کوچک، چشم اندازی برای طراحی و ساخت تقویت کننده‌های کلاس E با بازدهی و توان بالا در فرکانس‌های مایکرو ویو و بالاتر نشان می‌دهند. در مقابل، اخیراً، فناوری *CMOS* بدلیل قابلیت مجتمع سازی بالا و همچنین قیمت کم مورد توجه طراحان سیستم‌های مخابراتی قرار گرفته است. البته ساخت تقویت کننده‌های قدرت بوسیله‌ی این فناوری هنوز یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها در پیشرفت سیستم‌های مخابراتی کاملاً مجتمع

باقی مانده است. مقاومت حالت روشن بالای ترانزیستورهای MOS و همچنین ظریب کیفیت بسیار پایین القاکننده‌ها و همچنین اتصالات داخلی ساخته شده بر روی تراشه، اصلی‌ترین عوامل محدود کننده‌ی بازدهی تقویت کننده‌های قدرت کلاس E در فناوری $CMOS$ هستند. همچنین خازن بزرگ ترانزیستور-های MOS باعث محدودیت فرکانس کاری تقویت کننده‌ی کلاس E می‌شود.

در کنار فناوری‌هایی که برای بهبود عملکرد تقویت کننده‌ی کلاس E ارائه گردیده و مورد استفاده قرار گرفته، ساختارهای دیگری از تقویت کننده‌ی کلاس E و همچنین بهینه سازی‌هایی در شبکه‌ی بار آن برای غلبه بر عوامل پارازیتیکی مورد توجه طراحان قرار گرفته است. برای مثال ساختار کسکود قابلیت استفاده از منبع ولتاژ تغذیه‌ای دوبرابر تقویت کننده‌ی ابتدایی کلاس E را فراهم می‌کند. همچنین استفاده از القاکننده‌ی تغذیه‌ی محدود بجای چوک می‌تواند فرکانس کار تقویت کننده را تا ۱.۴ برابر برای افزاره‌ی مشخصی بالا ببرد.

در این پژوهش، ساختار جدیدی از مدار بار تقویت کننده‌ی کلاس E ارائه شده است که به بهبود چندین مشخصه از این تقویت کننده در کنار بهره‌گیری از خاصیت سوئیچ شدن نرم آن می‌انجامد. پس از بررسی تحلیلی این تقویت کننده، نتایج آن با نتایج شبیه سازی غیر ایده‌آل مقایسه شده که خبر از صحت تحلیل‌های انجام شده دارند. با استفاده از یک خازن و یک القاکننده در بار تقویت کننده اگرچه پیچیدگی طراحی افزایش یافته، مشخصاتی چون خازن موازی، مقاومت بار، ظرفیت توان خروجی، پهنای باند و هارمونیک‌های خروجی بطور چشمگیری بهبود پیدا کرده‌اند.

فصل اول

مبانی تقویت کننده‌های قدرت

۱-۱ مقدمه

تقویت کننده‌ی قدرت وسیله‌ای اساسی برای تحقق سیستم‌های مخابراتی بیسیم می‌باشد. کاربردهای تقویت‌کننده‌ی قدرت زمینه‌های گسترده‌ای چون مخابرات راه دور، رادارها، تجهیزات نظامی، گرم کننده‌ها و تصویربرداری پزشکی مایکروویو را در بر می‌گیرد. چنین گستره‌ی وسیعی از کاربردها، مشخصات گوناگونی از تقویت کننده‌ها از نظر کارکرد، فناوری و نیازهای طراحی را طلب می‌کند.

طراحی تقویت کننده‌های قدرت معمولاً با چندین مصالحه برای رسیدن به پارامترهایی چون خطی بودن، بازدهی و توان خروجی بالا و اعوجاج پایین درگیر می‌باشد. روش طراحی تقویت کننده‌ی قدرت به فرکانس کاری و پهنای باند، فناوری در دسترس، کاربرد و مشخصات دیگری وابسته است.

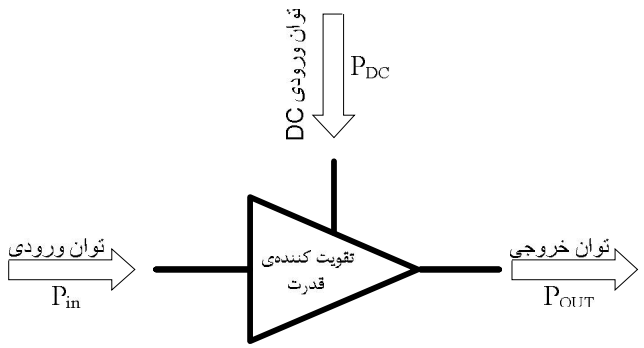
در ادامه‌ی این فصل، پارامترهای مهم تقویت کننده‌ی قدرت برشمرده می‌شود. همچنین برای آشنایی با دلایل کاهش بازدهی تقویت کننده‌ی قدرت، مکانیزم‌های مصرف توان در مدار تقویت کننده مورد بررسی قرار می‌گیرند. در نهایت تقویت کننده‌های قدرت را دسته بندی کرده و به اختصار به خصوصیات آن‌ها می‌پردازیم.

۱-۲ بازدهی و ظرفیت توان

یکی از مهمترین مشخصات تقویت کننده‌های قدرت *بازدهی توان*[1] آن‌ها می‌باشد. بازدهی توان برای اندازه گیری کیفیت تقویت کننده در تبدیل توان تغذیه‌ی ورودی به توان قابل استفاده‌ی خروجی استفاده می‌شود. با افزایش بازدهی تقویت کننده‌های قدرت، توان مصرفی تقویت کننده کاهش می‌یابد که می‌تواند به کاهش اندازه‌ی باطری و طول عمر آن‌ها در وسائل قابل حمل بینجامد. توان تلف شده در تقویت کننده‌های قدرت خود را بشکل گرما نشان می‌دهد که در سیستم‌های ثابت پر توان باعث کاهش اعتمادپذیری و افزایش هزینه خنک کننده‌ها می‌شود. بازدهی توان بصورت نسبت متوسط توان خروجی به متوسط توان DC ورودی تعریف می‌شود:

$$\eta \triangleq \frac{P_{OUT}}{P_{DC}} \qquad (۱-۱)$$

در این رابطه، متوسط توان خروجی P_{OUT}، توان تحویلی مفید به بار خروجی است (شکل ۱-۱). در کاربردهای مخابراتی معمولاً توان خروجی مفید، هارمونیک‌های ناخواسته‌ی بوجود آمده در خروجی را شامل نمی‌شود. در این کاربردها توان خروجی در فرکانس خاص f بصورت:



شکل ۱-۱ شمایی از تقویت کننده ی قدرت و توان های ورودی و خروجی آن.

[1] *Power efficiency*

$$P_{out} = P_{out}(f) = \frac{1}{2}\left\{v_{out}.i_{out}^{*}\right\} \qquad (۲-۱)$$

بدست می‌آید. توان DC ورودی کشیده شده از یک منبع ولتاژ DC بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{DC} = V_{DC}\frac{1}{T}\int_{0}^{T} I_{DC}(t)dt \qquad (۳-۱)$$

بازدهی توان همچنین با *بازدهی درین*[1] یا *بازدهی کلکتور*[2] بترتیب در ساختارهای تقویت کننده-های قدرت مبتنی بر فناوری تراتزیستورهای اثر میدان و دوقطبی، شناخته می‌شوند.

تقریباً در تمام سیستم‌ها به چندین طبقه‌ی راه انداز بین منبع سیگنال و تقویت کننده‌ی قدرت طبقه‌ی آخر نیاز است. با در نظر گرفتن توان DC مصرفی طبقات راه انداز میانی، *بازدهی کلی*[3] تقویت کننده‌ی قدرت بصورت زیر تعریف می‌شود [۲].

$$\eta_{oa} \triangleq \frac{P_{out}}{P_{DC,PA} + \sum_{i=0}^{n} P_{DC,Drive,i}} \qquad (٤-۱)$$

مشخصه‌ی مهمی که تا بدینجا در بازدهی درین و در بازدهی کلی لحاظ نشده، توان مورد نیاز برای راه اندازی تقویت‌کننده می‌باشد. تعریف بهتری از بازدهی تقویت کننده‌ی قدرت را *بازدهی توان افزوده*[4] (PAE) ارائه می‌کند که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{add} \triangleq \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}} = \frac{P_{out}.(1-1/G)}{P_{DC}} = \eta\left(1-\frac{1}{G}\right) \qquad (٥-۱)$$

که در این رابطه، G بهره‌ی توان تقویت کننده‌ی قدرت است که بصورت نسبت توان خروجی به توان ورودی تعریف می‌شود که توان ورودی هست:

$$P_{in} = P_{in}(f) = \frac{1}{2}\mathrm{Re}\left\{v_{in}.i_{in}^{*}\right\} \qquad (٦-۱)$$

[1] *Drain efficiency*
[2] *Collector efficiency*
[3] *Overall efficiency*
[4] *Power added efficiency*