



**Amirkabir University of Technology
(Tehran Polytechnic)**

Electrical Engineering Department

M.Sc. Thesis

**Power conversion efficiency enhancement in RF
energy harvesting systems for IoT applications**

**By
Ataollah Mahsifar**

**Supervisor
Dr. Mohammad Yavari**

November 2021

بسم الله الرحمن الرحيم



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد

گرایش الکترونیک-مدارهای مجتمع

عنوان پایان نامه

افزایش راندمان تبدیل توان در سیستم‌های استحصال انرژی امواج رادیویی برای

کاربردهای اینترنت اشیا

نگارش

عطاالله مهسافر

استاد راهنما

دکتر محمد یآوری

آذرماه ۱۴۰۰

اینجانب **عطاالله مهسافر** متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است.

در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگیری قانونی خواهد داشت.

کلیه نتایج و حقوق حاصل از این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ممنوع است. نقل مطالب با ذکر مآخذ بلامانع است.

امضا

تقديم به:

پدر، مادر و برادر عزيزم

تشکر و قدردانی:

صمیمانه‌ترین سپاس خود را به استاد فرزانه جناب آقای دکتر محمد یآوری تقدیم می‌نمایم که در این راه پرمشقت، روشنگر مسیرم بوده‌اند و بدون راهنمایی‌های گران‌قیمت ایشان، تأمین این پایان نامه برایم بسیار مشکل می‌نمود. از دوستان عزیزم در آزمایشگاه طراحی مدارهای مجتمع، خانم‌های مهندس منصوره یوسفی، عطیه کریملو، بهاره شیرمحمدی و آقایان مهندس حسام عباسی، فرشاد گوزل پور و علیرضا احرار که محیطی آرام و دوستانه را فراهم نموده و از راهنمایی‌هایشان بسیار بهره بردم صمیمانه قدردانی می‌نمایم. همچنین از اساتید ارجمند جناب آقای دکتر حسن کاتوزیان و جناب آقای دکتر محسن معزی که داوری این پایان نامه را برعهده گرفتند، بینهایت سپاسگزارم.

و در خاطرم هست که آرامش امروز را، مدیون خون تک تک شهدا هستیم....

چکیده

امروزه تامین انرژی الکتریکی دستگاه‌هایی که استفاده از باتری یا سیم کشی مستقیم به آنها دشوار است، دغدغه‌ی محقق این عرصه شده است. اگرچه هنوز از متصل کردن به باتری یا وصل کردن مستقیم با سیم، برای تامین انرژی کاربردهایی مانند اینترنت اشیا استفاده می‌شود، اما از نظر محققین، بهترین پیشنهاد جایگزین برای این موضوع، استفاده از انرژی‌های موجود در محیط از جمله انرژی امواج رادیویی می‌باشد. سیستم برداشت انرژی از امواج رادیویی، از بخش‌های متنوعی از جمله آنتن، بالن و شبکه‌ی تطبیق، یکسوکننده و بخش ذخیره‌کننده تشکیل شده است.

در این پایان‌نامه، یک سیستم برداشت انرژی امواج رادیویی، پیشنهاد شده‌است که دارای یکسوکننده تفاضلی با محدوده‌ی پویایی بالا می‌باشد. یکسوکننده پیشنهادی، از یکسوکننده‌ی معمولی و دوساختار فیدبک و فید فوروارد تشکیل شده است، که به وسیله‌ی این مسیرها، بازده تبدیل توان یکسوکننده در توان‌های ورودی مختلف، بالا نگه داشته می‌شود و در نتیجه، محدوده‌ی دینامیکی بالایی بوجود می‌آید. همچنین، این یکسوکننده حساسیت بهتری نیز دارد. بهبود بوجود آمده در یکسوکننده، نتایج نهایی سیستم کلی را نیز رضایت بخش‌تر می‌کند. در سیستم نهایی از مدار تطبیق خارج از تراشه نوع π و بالن ADTL2-18+ به عنوان بالن خارج از تراشه استفاده شده‌است. عملیات تطبیق در تک فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز و توان 19.5 dBm طراحی شده است. مدار با فناوری ۱۸۰ نانومتر CMOS شبیه‌سازی شده و پس از آن، شبیه‌سازی بعد از لی‌آوت در نرم افزار کیدنس انجام گرفته است و پس از استخراج اجزای پارازیتی، به نرم افزار ADS انتقال یافته تا با قسمت‌های خارج تراشه مدار کلی را تشکیل دهد.

نتایج راندمان تبدیل توان و محدوده‌ی پویایی بعد از لی‌آوت یکسوکننده مدار به ترتیب 86.03 % و 9.8 dB می‌باشد. حساسیت کلی این یکسوکننده نیز برابر با مقدار 19.3 dBm- است. در یک کلام می‌شود گفت که در مدار پیشنهادی نسبت به مدار معمولی، 5.03 % در بازدهی تبدیل توان، 5.01 dB در حساسیت و 3.5 dBm در محدوده‌ی پویایی بهبود حاصل شده است. همچنین یکسوکننده‌ی مورد نظر در یک طبقه طراحی شده است که دارای مساحت مصرفی $106 \mu\text{m} \times 72.5 \mu\text{m}$ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی:

برداشت انرژی، انرژی امواج رادیویی، یکسوکننده، محدوده‌ی پویایی، راندمان تبدیل توان.

فصل اول: مقدمه.....	۱.....
۱-۱- ضرورت توجه به سیستم های برداشت انرژی.....	۱.....
۲-۱- برداشت انرژی با تکیه بر امواج رادیویی.....	۲.....
۳-۱- کاربردهای سیستم برداشت انرژی امواج رادیویی.....	۳.....
۴-۱- ساختار پایان نامه.....	۴.....
فصل دوم: تاریخچه و مفاهیم کلی سیستم های برداشت انرژی.....	۵.....
۱-۲- مرور کلی سیستم انتقال توان.....	۶.....
۱-۱-۲- روش های انتقال توان بی سیم.....	۷.....
۲-۲- گیرنده توان بی سیم.....	۹.....
۱-۲-۲- مشخصات گیرنده توان.....	۱۰.....
۳-۲- آنالیز یکسوکننده نیم موج یک طبقه.....	۱۱.....
۴-۲- خلاصه فصل.....	۱۶.....
فصل سوم: مرور کارهای پیشین.....	۱۸.....
۱-۳- مدار دو برابر کننده ولتاژ دیکسون.....	۱۹.....
۲-۱-۳- تغییر در نحوه ی اتصال سیم های ترانزیستور برای جبران سازی ولتاژ آستانه ترانزیستورها.....	۲۲.....
۳-۱-۳- کاهش ولتاژ آستانه با استفاده از تکنیک های مبتنی بر تکنولوژی.....	۲۲.....
۲-۳- مدار یکسوکننده تفاضلی.....	۲۳.....
۱-۲-۳- استفاده از ترانزیستور با ولتاژ آستانه ی بالا برای کاهش جریان بازگشتی.....	۲۴.....
۲-۲-۳- استفاده از مدارهای کمکی برای کاهش جریان بازگشتی.....	۲۵.....
۳-۲-۳- تغییر در نحوه ی اتصال سیم های ترانزیستور در یکسوکننده ی تفاضلی.....	۲۷.....
۳-۳- خلاصه فصل.....	۲۹.....
فصل چهارم: مدار پیشنهادی برداشت انرژی.....	۳۰.....
۱-۴- استفاده از ترانزیستورهای آرایش دیودی برای شبکه ی فیدبک.....	۳۳.....
۲-۴- استفاده از ترانزیستورهای آرایش دیودی برای شبکه ی فیدفوروارد.....	۳۶.....
۳-۴- استفاده همزمان از شبکه دیودی فیدبک و فیدفوروارد در طرح نهایی.....	۳۸.....
۴-۴- طراحی مدار تطبیق و بقیه مدار برداشت انرژی.....	۴۱.....
۱-۴-۴- انتخاب آنتن.....	۴۱.....
۲-۴-۴- انتخاب بالن.....	۴۱.....
۳-۴-۴- طراحی مناسب مدار تطبیق.....	۴۲.....
۵-۴- خلاصه فصل.....	۴۴.....

فصل پنجم: شبیه سازی سیستم پیشنهادی.....	۴۶
۵-۱- نتایج حاصل از مدار تطبیق و یکسوکننده.....	۴۷
۵-۱-۱- راندمان تبدیل توان یکسوکننده پیشنهادی.....	۵۲
۵-۱-۲- حساسیت یکسوکننده پیشنهادی.....	۵۴
۵-۱-۳- بررسی مدار در گوشه های تکنولوژی.....	۵۵
۵-۱-۴- بررسی مدار با بارهای مختلف.....	۵۶
۵-۲- نتایج حاصل از کل مدار.....	۵۸
۵-۳- خلاصه فصل.....	۶۰
فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات.....	۶۲
۶-۱- نتیجه گیری.....	۶۲
۶-۲- پیشنهادات.....	۶۴
منابع و مراجع.....	۶۵

صفحه

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲): سخنرانی تسلا در خصوص انتقال انرژی الکتریکی بدون سیم در کالج کلمبیا [۵]..... ۶
- شکل (۲-۲): فرایند چهار مرحله ای انتقال توان [۶]..... ۶
- شکل (۳-۲): باندهای فرکانسی در روش های انتقال توان [۱۲]..... ۹
- شکل (۴-۲): نمودار بلوکی یک سیستم برداشت انرژی ۹
- شکل (۵-۲): مدار یک طبقه ی یکسوکننده ی نیم موج [۱۸]..... ۱۲
- شکل (۶-۲): شکل موج ولتاژهای مدار [۱۸]..... ۱۳
- شکل (۷-۲): مدار در حالت هدایت مستقیم زیر آستانه [۱۸]..... ۱۴
- شکل (۸-۲): مدار در حالت هدایت معکوس زیر آستانه [۱۸]..... ۱۴
- شکل (۱-۳): مدار دیکسون [۲۳]..... ۱۹
- شکل (۲-۳): نمونه ای از استفاده از مدار کمکی برای جبران ولتاژ آستانه ترانزیستورها [۲۴]..... ۲۰
- شکل (۳-۳): نمونه ای دیگر از استفاده از مدار کمکی برای جبران ولتاژ آستانه ترانزیستورها [۲۵]..... ۲۱
- شکل (۴-۳): نمونه ای از تغییر در نحوه ی اتصال سیم های ترانزیستورها برای جبران ولتاژ آستانه ترانزیستورها [۲۶]..... ۲۲
- شکل (۵-۳): تکنیک گیت شناور..... ۲۳
- شکل (۶-۳): یکسوکننده ی تفاضلی معمولی [۲۷]..... ۲۴
- شکل (۷-۳): تفاوت جریان های ترانزیستورهای نوع P در مدار مقاله و معمولی [۲۸]..... ۲۴
- شکل (۸-۳): نمونه ای از استفاده از مدار کمکی برای کاهش جریان بازگشتی [۲۹]..... ۲۶
- شکل (۹-۳): نمونه ای دیگر برای استفاده از مدار کمکی برای کاهش جریان بازگشتی [۳۰]..... ۲۶
- شکل (۱۰-۳): نمونه ای دیگر برای استفاده از مدار کمکی برای کاهش جریان بازگشتی [۳۱]..... ۲۷
- شکل (۱۱-۳): استفاده از تکنیک SBB برای کاهش ولتاژ آستانه در مرجع [۳۲]..... ۲۸
- شکل (۱۲-۳): سری یکسوکننده های مختلف برای رسیدن به انرژی و ولتاژ بیشتر [۳۲]..... ۲۸
- شکل (۱۳-۳): تکنیک جبران کننده ی فیدبکی استفاده شده در یکسوکننده ی تفاضلی مرجع [۳۳]..... ۲۹
- شکل (۱-۴): یکسوکننده ی تفاضلی معمولی [۲۷]..... ۳۱

- شکل (۲-۴): حلقه ی ایجاد شده در سیکل مثبت..... ۳۱
- شکل (۳-۴): حلقه ی ایجاد شده در سیکل منفی..... ۳۲
- شکل (۴-۴): نتیجه حاصل از مدار یکسوکننده معمولی..... ۳۳
- شکل (۵-۴): اضافه کردن دیود کمکی برای مهار جریان بازگشتی ترانزیستورهای نوع P..... ۳۳
- شکل (۶-۴): نتیجه حاصل از اضافه کردن دیود کمکی در سمت راست..... ۳۴
- شکل (۷-۴): اضافه کردن دیود کمکی برای مهار جریان بازگشتی ترانزیستورهای نوع N..... ۳۴
- شکل (۸-۴): اضافه کردن دیود کمکی برای مهار جریان بازگشتی ترانزیستورهای هر دو نوع..... ۳۵
- شکل (۹-۴): نتیجه حاصل از اضافه کردن دیود کمکی در هر دو سمت..... ۳۵
- شکل (۱۰-۴): نحوه ی قرارگیری دیودهای فیدفوروارد در مدار..... ۳۷
- شکل (۱۱-۴): حالت های مختلف دیود SBB..... ۳۸
- شکل (۱۲-۴): شماتیک مدار یکسوکننده ی نهایی..... ۳۹
- شکل (۱۳-۴): حالت پایدار مدار برای (الف) توان های پایین و (ب) توان های بالا..... ۴۰
- شکل (۱۴-۴): جریان متناوب ترانزیستور نوع P در حالت پایدار برای یکسوکننده ی معمولی و پیشنهادی..... ۴۰
- شکل (۱۵-۴): شارژ متناوب تولید و مصرق شده در یکسوکننده معمولی و پیشنهادی به ازای تولید 1.5 ولت در خروجی هر دو ۴۱
- شکل (۱۶-۴): مدار کلی سیستم..... ۴۳
- شکل (۱۷-۴): نمودار مفهومی طراحی مدار تطبیق برای سیستم های غیرخطی و سیگنال بزرگ..... ۴۴
- شکل (۱-۵): نمایی کلی از پارامترهای S بالن..... ۴۷
- شکل (۲-۵): مدار یکسوکننده و تطبیق در کنار هم..... ۴۸
- شکل (۳-۵): لی آت مدار یکسوکننده..... ۴۹
- شکل (۴-۵): نتیجه ی S_{11} مدار تطبیق بر حسب فرکانس در توان -19.5 dBm..... ۴۹
- شکل (۵-۵): نتیجه ی S_{11} مدار تطبیق بر حسب توان ورودی در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز..... ۵۰
- شکل (۶-۵): قسمت حقیقی امپدانس ورودی تطبیق در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز..... ۵۰
- شکل (۷-۵): قسمت حقیقی امپدانس ورودی تطبیق در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز..... ۵۱
- شکل (۸-۵): مدار یکسوکننده معمولی تفاضلی و شبکه ی تطبیق در کنار هم..... ۵۱

- شکل (۵-۹): لی آوت مدار یکسوکننده معمولی تفاضلی..... ۵۲
- شکل (۵-۱۰): راندمان تبدیل توان برای یکسوکننده و مدار تطبیق در مدارهای معمولی و پیشنهادی..... ۵۳
- شکل (۵-۱۱): بزرگنمایی شده ی راندمان تبدیل توان برای یکسوکننده و مدار تطبیق در مدارهای معمولی و پیشنهادی..... ۵۳
- شکل (۵-۱۲): بازدهی مدار ارائه شده بر حسب توان ورودی و به حالت میکرووات..... ۵۴
- شکل (۵-۱۳): حساسیت یکسوکننده برای مدار معمولی و پیشنهادی..... ۵۵
- شکل (۵-۱۴): راندمان در گوشه‌های تکنولوژی..... ۵۵
- شکل (۵-۱۵): حساسیت در گوشه‌های تکنولوژی..... ۵۶
- شکل (۵-۱۶): راندمان تبدیل توان در بارهای مختلف..... ۵۷
- شکل (۵-۱۷): حساسیت در بارهای مختلف..... ۵۷
- شکل (۵-۱۸): نمای کلی مدار..... ۵۹
- شکل (۵-۱۹): راندمان تبدیل توان کل..... ۵۹
- شکل (۵-۲۰): حساسیت مدار کل..... ۵۹

صفحه

فهرست جدول‌ها

جدول (۱-۵): اندازه المان‌های طراحی شده.....	۴۸
جدول (۲-۵): اندازه المان‌های مدار تفاضلی معمولی.....	۵۲
جدول (۳-۵): نتایج حاصل از یکسوکننده و تطبیق در گوشه‌های تکنولوژی.....	۵۶
جدول (۴-۵): مقایسه یکسوکننده با کارهای پیشین.....	۵۸
جدول (۴-۵): مقایسه مدار کل با کارهای پیشین	۶۰

واژه نامه

Zero Threshold	آستانه صفر
Body effect	اثر بدنه
Energy Harvesting	استحصال انرژی
Saturation	اشباع
Internet of Things (IoT)	اینترنت اشیا
Reactive Coupling	القای واکنش گر
Power conversion efficiency (PCE)	بازدهی تبدیل توان
Post-Layout	بعد از لی آوت
Radiation	تابش-تشعشع
Dummy transistor	ترانزیستور اضافی
Passive voltage amplification	تقویت غیرفعال ولتاژ
Low noise amplifier (LNA)	تقویت کننده کم نویز
Conductive loss	تلفات هدایت
Reverse leakage	جریان نشتی
Forward	جلورونده
Sensitivity	حساسیت
Off-chip	خارج تراشه
Self compensation	خود جبران ساز
On-chip	داخل تراشه

Subthreshold	زیر آستانه
Silicon on sapphire	سیلیکون روی یاقوت
Large signal	سیگنال بزرگ
Small signal	سیگنال کوچک
Impedance matching network	شبکه تطبیق امپدانس
Wireless sensor networks (WSN)	شبکه‌ی سنسورهای بی‌سیم
Quality factor	ضریب کیفیت
Backward	عقب‌رونده
Radio Frequency (RF)	فرکانس رادیویی
Angular Frequency	فرکانس زاویه‌ای
Charge conservation law	قانون بقای بار
Medical implants	کاشت پزشکی در بدن
Floating gate	گیت شناور
Dynamic range (DR)	محدوده پویایی
Complex conjugate	مزدوج مختلط
Far field	میدان دور
Near Field	میدان نزدیک
Dead zone	ناحیه‌ی مرده
Half-wave rectifier	یکسوکننده نیم موج

منابع و مراجع

- [1] K. Lin, J. Yu, J. Hsu, S. Zahedi, D. Lee, J. Friedman, A. Kansal, V. Raghunathan, and M. Srivastava, "Helimote: Enabling Long-Lived Sensor Networks Through Solar Energy Harvesting", *3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Nov. 2005.
- [2] K. Kotani, A. Sasaki, and T. Ito, "High-efficiency differential-drive CMOS rectifier for UHF RFIDs," *IEEE J. Solid- State Circuits*, vol. 44, no. 11, pp. 3011–3018, Nov. 2009.
- [3] S. Mandal and R. Sarpeshkar, "Low-power CMOS rectifier design for RFID applications," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 54, no. 6, pp. 1177–1188, Jun. 2007.
- [4] H. Hertz, "Ueber die einwirkung einer geradlinigen electrischen schwingung auf eine benachbarte strombahn," *Annalen der Physics*, vol. 270, no. 5, pp. 155–170, 1888.
- [5] N. Tesla, "Experiments with alternate currents of very high frequency and their application to methods of artificial illumination," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 8, no. 1, pp. 266–319, 1891.
- [6] W. C. Brown, "The history of power transmission by radio waves," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 32, no. 9, pp. 1230–1242, Sep. 1984.
- [7] J. Dai and D. C. Ludois, "A survey of wireless power transfer and a critical comparison of inductive and capacitive coupling for small gap applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6017–6029, Nov. 2015.
- [8] M. Kline, I. Izyumin, B. Boser, and S. Sanders, "Capacitive power transfer for contactless charging," *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Mar. 2011.
- [9] E. Culurciello and A. G. Andreou, "Capacitive Inter-Chip Data and Power Transfer for 3-D VLSI," *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs*, vol. 53, no. 12, pp. 1348–1352, Dec. 2006.
- [10] P. E. Glaser, "Power from the sun: Its future," *Science*, vol. 162, no. 3856, pp. 857–861, Nov. 1968.
- [11] P. Ning, J. M. Miller, O. C. Onar, and C. P. White, "A compact wireless charging system for electric vehicles," *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Sep. 2013.

-
- [12] D. M. Dobkin, *The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice.*, MA, USA: Newnes, 2007.
 - [13] A. Ashry, K. Sharaf, and M. Ibrahim, "A Simple and Accurate Model for RFID Rectifier," *IEEE Systems Journal*, vol. 2, no. 4, pp. 520–524, Dec. 2008.
 - [14] C.-J. Li and T.-C. Lee, "2.4-GHz High-efficiency adaptive power harvester," *IEEE Trans. VLSI Syst.*, vol. 22, no. 2, pp. 434–438, Feb. 2014.
 - [15] J.-P. Curty, N. Joehl, F. Krummenacher, C. Dehollaini, and M. Declercq, "A model for μ -power rectifier analysis and design," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 52, no. 12, pp. 2771–2779, Dec. 2005.
 - [16] R. Barnett, J. Liu, and S. Lazar, "A RF to DC voltage conversion model for multi-stage rectifiers in UHF RFID transponders," *IEEE J. Solid- State Circuits*, vol. 44, no. 2, pp. 354–370, Feb. 2009.
 - [17] J. Yi, W.-H. Ki, and C. Ying Tsui, "Analysis and design strategy of UHF micro-power CMOS rectifiers for micro-sensor and RFID applications," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 54, no. 1, pp. 153–166, Jan. 2007.
 - [18] A. A. R. Haeri, M. G. Karkani, M. Sharifkhani, M. Kamarei, and A. Fotowat-Ahmady, "Analysis and design of power harvesting circuits for ultra-low power applications," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 64, no. 2, pp. 471–479, Feb. 2017.
 - [19] J.-P. Curty, N. Joehl, C. Dehollain, and M. Declercq, "Remotely powered addressable UHF RFID integrated system," *IEEE J. Solid- State Circuits*, vol. 40, no. 11, pp. 2193 – 2202, Nov. 2005.
 - [20] Y. Hong, C. F. Chan, J. Guo, Y. S. Ng, W. Shi, M. Ho, L. K. Leung, K. N. Leung, C. S. Choy, and K. P. Pun, "Design and challenges of passive UHF RFID tag in 90nm CMOS technology," *IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits*, Dec. 2008.
 - [21] F. Yuan and N. Soltani, "Design techniques for power harvesting of passive wireless microsensors," *51st Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Aug. 2008.
 - [22] A. Poon, S. O'Driscoll, and T. Meng, "Optimal Frequency for Wireless Power Transmission into Dispersive Tissue," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 5, pp. 1739 –1750, May 2010.
 - [23] J. F. Dickson, "On-chip high-voltage generation in MNOS integrated circuits using an improved voltage multiplier technique," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 11, no. 3, pp. 374–378, Jun. 1976.
 - [24] P. Saffari, A. Basaligheh, K. Moez, "An RF-to-DC rectifier with high efficiency over wide input power range for RF energy harvesting applications," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 66, no. 12, pp. 4862–4875, Dec. 2019.

- [25] K. Gharehbaghi, Ö. Zorlu, F. Koçer, and H. Külâh, "Threshold compensated UHF rectifier with local self-calibrator," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 27, no. 6, pp. 575–577, Jun. 2017.
- [26] Z. Hameed and K. Moez, "Hybrid forward and backward threshold- compensated RF-DC power converter for RF energy harvesting," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Circuits Syst.*, vol. 4, no. 3, pp. 335–343, Sep. 2014.
- [27] K. Kotani, A. Sasaki, and T. Ito, "High-efficiency differential-drive CMOS rectifier for UHF RFIDs," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 44, no. 11, pp. 3011–3018, Nov. 2009.
- [28] H. Kim and I. Kwon, "Design of high-efficiency CMOS rectifier with low reverse leakage for RF energy harvesting," *Electronics Letters*, vol. 55, no. 8, pp. 446–448, Apr. 2019.
- [29] M. H. Ouda, W. Khalil, and K. N. Salama, "Wide-range adaptive RF-to-DC power converter for UHF RFIDs," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 26, no. 8, pp. 634–636, Aug. 2016.
- [30] M. H. Ouda, W. Khalil, and K. N. Salama, "Self-biased differential rectifier with enhanced dynamic range for wireless powering," *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs*, vol. 64, no. 5, pp. 515–519, May 2017.
- [31] A. S. Almansouri, M. H. Ouda and K. N. Salama, "A CMOS RF-to-DC Power Converter With 86% Efficiency and -19.2 -dBm Sensitivity," *IEEE Tran. Micro. Theory Techn.*, vol. 66, no. 5, pp. 2409–2415, May 2018.
- [32] A. K. Moghaddam, J. H. Chuah, H. Ramiah, J. Ahmadian, P.-I. Mak, and R. P. Martins, "A 73.9%-efficiency CMOS rectifier using a lower DC feeding (LDCF) self-body-biasing technique for far-field RF energy harvesting systems," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 64, no. 4, pp. 992–1002, Apr. 2017.
- [33] H. J. Visser and R. J. M. Vullers, "RF energy harvesting and transport for wireless sensor network applications: Principles and requirements," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1410–1423, Apr. 2013.
- [34] G. Chong, H. Ramiah, J. Yin, J. Rajendran, P. Mak and R. P. Martins, "A Wide-PCE-Dynamic-Range CMOS Cross-Coupled Differential- Drive Rectifier for Ambient RF Energy Harvesting," *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs*, Sep. 2019.
- [35] W. W. Y. Lau and L. Siek, "2.45 GHz wide input range CMOS rectifier for RF energy harvesting," *IEEE Wireless Power Transf. conf. (WPTC)*, May 2017.
- [36] Y. Lu et al., "A wide input range dual-path CMOS rectifier for RF energy harvesting," *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs*, vol. 64, no. 2, pp. 166–170, Feb. 2017.

- [37] S. M. Noghabaei, R. L. Radin, Y. Savaria, and M. Sawan, "A high-efficiency ultra-low-power CMOS rectifier for RF energy harvesting applications," *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, May 2018.
- [38] D. Khan, S. J. Oh, K. Shehzad, M. Basim, D. Verma, Y. G. Pu, M. Lee, K. C. Hwang, Y. Yang, and K.-Y. Lee, "An efficient reconfigurable RFDC converter with wide input power range for RF energy harvesting," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 79310-79318, Apr. 2020.

Abstract

Today, energy harvesting systems have become more darling, and this is because of the fact that EH technology is an available way for powering different applications. Actually, RFEH systems are formed by four parts such as antenna, balun, matching network, rectifier, and storage unit. RF-to-DC Rectifiers are the heart of these systems that produce DC supply voltage by the antenna's incoming RF energy.

This thesis proposes a radio frequency energy harvesting system that has a novel high dynamic range rectifier. This rectifier has two feedback and feed-forward structures. These paths keep the rectifier's power conversion efficiency high at different input powers and thus create a high dynamic range. This rectifier also has better sensitivity. Advances in the rectifier also make final systems results more satisfying. The circuit is simulated with 180nm CMOS technology at a frequency of 900MHz. Also, a π type matching network circuit is used because the circuit works in a large-signal mood, it shows different input impedance at different input powers; this circuit is matched at $P_{in}=-19.5$ dBm and $f=900$ MHz. In addition, an off-chip balun named ADTL2-18+ is used as the system's balun.

The circuit' rectifier's results show PCE and DR at 86.03% and 9.8dB, respectively. These results are with -19.3 sensitivity at 1 V output voltage. This rectifier is designed in one stage and its area is $106 \mu\text{m} \times 72.5 \mu\text{m}$.

Key Words: RF energy harvesting, rectifier, dynamic range, CMOS, power conversion efficiency, RF-to-DC converter



**Amirkabir University of Technology
(Tehran Polytechnic)**

Electrical Engineering Department

M.Sc. Thesis

**Power conversion efficiency enhancement in RF
energy harvesting systems for IoT applications**

**By
Ataollah Mahsifar**

**Supervisor
Dr. Mohammad Yavari**

November 2021