



Volume 6, Issue 1, 2025

The Effect of Innovative Internet of Things Communication Networks on the Management of Wireless Power Transmission

Abbas Ghaderi¹ Mohammad Hassan Shakki^{*2}

1. PhD student, Department of Management, Ghaemshahr Branch, Islamic Azad University, Ghaemshahr, Iran.

2. Assistant Professor, Department of Management, Ghaemshahr Branch, Islamic Azad University, Ghaemshahr, Iran. (Corresponding Author) Email: mh_shakki@yahoo.com

ARTICLE INFORMATION

Type of Article:

Original Research

Pages: 12-25

Corresponding Author's Info

Email:

mh_shakki@yahoo.com

Keywords:

Wireless power transfer system, Internet of Things, state estimation, extended Kalman filter.

ABSTRACT

Today, wireless power transmission (WPT) systems have attracted significant attention due to their high efficiency, clean energy, and extensive applications. However, monitoring the operational states of WPT systems requires advanced infrastructure. The Internet of Things (IoT) offers a promising solution by providing extensive connectivity, advanced sensing, real-time information processing, and high flexibility. Generally, WPT inductive circuits connected to smart grids continuously generate massive amounts of data from various locations. Traditional power line communications often struggle with bandwidth limitations and low transmission rates. To address this challenge, this study proposes an innovative IoT-based communication infrastructure for remote data transmission in WPT systems. Furthermore, a linear state-space model of the WPT system, incorporating IoT network dynamics, is developed for accurate state estimation. To estimate the system states, the Kalman Filter (KF) algorithm is employed, and an optimal feedback controller is designed to stabilize the system states effectively. Simulation results demonstrate that the proposed approach significantly reduces estimation errors and convergence time compared to conventional methods, such as the recursive least squares approach. Additionally, the proposed IoT infrastructure utilizes appropriate bandwidth and high transmission rates, enabling the effective handling of massive data volumes and enhancing the overall efficiency of the WPT system. Ultimately, this framework provides a robust foundation for smart control centers in future WPT applications.



This is an open access article under the CC BY license. © 2025 The Authors.

How to Cite This Article: Ghaderi, A. and Shakki, M. H. (2025). The Effect of Innovative Internet of Things Communication Networks on the Management of Wireless Power Transmission. *Management, Economics and Entrepreneurship Studies*, 6(1): 12-25. Doi: 10.22034/jmek.2024.495477.1156



دوره ۶، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴

تأثیر شبکه ارتباطی نوآورانه اینترنت اشیا در مدیریت انتقال قدرت بی سیم

عباس قادری^۱ محمدحسن شکی^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری، گروه مدیریت، واحد قائم شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم شهر، ایران.

۲. استادیار، گروه مدیریت، واحد قائم شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم شهر، ایران. mh_shakki@yahoo.com

چکیده

امروزه سیستم‌های انتقال قدرت بی سیم (WPT) به دلیل مزایایی همچون کارایی بالا، انرژی پاک، اتصالات گسترده و ایمنی در محیط‌های ناسازگار، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. برای نظارت مؤثر بر وضعیت عملکردی این سیستم‌ها، استفاده از زیرساخت اینترنت اشیا (IoT) به عنوان یک راهکار نوآورانه مطرح شده است. IoT با فراهم کردن اتصالات گسترده‌تر، حسگری و راه‌اندازی پیشرفته، پردازش بلادرنگ اطلاعات و انعطاف‌پذیری بالا، امکان مدیریت هوشمند سیستم‌های WPT را فراهم می‌آورد. در این پژوهش، ابتدا یک زیرساخت نوآورانه مبتنی بر IoT برای انتقال داده‌های راه دور در سیستم WPT طراحی شده است. سپس، یک مدل خطی فضای حالت از سیستم انتقال قدرت بی سیم ارائه گردید که ضمن در نظر گرفتن شبکه‌های ارتباطی IoT، امکان تخمین دقیق متغیرهای حالت را فراهم می‌کند. برای تخمین حالت‌های سیستم، از الگوریتم فیلتر کالمن (KF) استفاده شده و برای تنظیم و تثبیت این حالت‌ها، یک کنترل کننده فیدبک بهینه طراحی گردید. شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی ضمن کاهش خطای تخمین، زمان لازم برای همگرایی و تثبیت حالت‌ها را نسبت به روش‌های موجود به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. همچنین، استفاده از زیرساخت IoT پیشنهادی با بهره‌گیری از پهنای باند مناسب و نرخ انتقال بالا، امکان ارسال مؤثر حجم عظیمی از داده‌ها را فراهم آورده و بهره‌وری کلی سیستم را افزایش می‌دهد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: پژوهشی

صفحات: ۲۵-۱۲

اطلاعات نویسنده مسئول

ایمیل:

mh_shakki@yahoo.com

سابقه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۲

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

واژگان کلیدی:

سیستم انتقال قدرت بی سیم، اینترنت اشیا، تخمین حالت، فیلتر کالمن توسعه یافته.



۱- مقدمه

بهینه و اینترنت ممکن است مورد استفاده قرار گیرند (داما و همکاران، ۲۰۱۶).

در این پژوهش یک IoT نوآورانه مبتنی بر زیرساخت ارتباطی برای حس یابی، راه اندازی، و ارسال اطلاعات به سمت مرکز کنترل پیشنهاد شده است. همچنین به منظور شناخت شرایط عملکرد سیستم های WPT، فیلتر کالمن مبتنی بر الگوریتم تخمین حالت دینامیک، کنترلر بهینه به منظور تنظیم حالت های سیستم طراحی شده است.

امروزه، سیستم های بیسیم انتقال قدرت (WPT) به دلیل اتصالات گسترده تر، کارایی بالاتر، قابلیت حمل، انرژی ایمن و پاک، حتی در زمان استفاده در محیط های ناسازگار توجهات بسیار زیادی را به خود جلب کرده اند (سواين و همکاران، ۲۰۱۴). به خاطر همین دلایل، سیستم های WPT به صورتی روزافزون در کاربردهای صنعتی متعدد از ایملنت های پزشکی تا شارژ دستگاه های الکتریک مورد استفاده قرار گرفته اند (روسلی و همکاران، ۲۰۱۴).

برای نظارت حالت های سیستم WPT، اینترنت اشیا (IoT) زیر ساختی بالقوه است که قادر است حس یابی / راه اندازی پیشرفته، پردازش اطلاعات، و انعطاف پذیری بزرگ تری را فراهم کند. شبکه اشیا ی هوشمند یا به اصطلاح اشیا ی فعال شده توسط اینترنت به همراه سرویس های وبی است که بر روی این اشیا تأثیر متقابلی می گذارند (هی و ما، ۲۰۱۲). این شبکه می تواند به اشیا ی هوشمند اجازه دهد تا بدون دخالت انسانی به صورت مستقیم به اینترنت متصل شوند. گاهی اوقات، اینترنت به عنوان یک رسانه انتقال عمل می کند، به صورتی که دستگاه های هوشمند تعبیه شده، داده را به سمت مرکز پردازش اطلاعات به منظور نمایش بلادرنگ ارسال می کنند (روسلی و همکاران، ۲۰۱۸).

با ظهور اطلاعات و فناوری ارتباطی، مقدار بزرگی از داده ها توسط دستگاه های هوشمند تولید شدند که می توانند با استفاده از زیر ساخت IoT، پردازش شوند، ارتباط برقرار کرده و ذخیره

در سال های اخیر توسعه قابل توجهی در زمینه لوازم الکترونیکی خصوصاً در کاربردهای پزشکی انجام شده است. اکثر سیستم های الکترونیک دارای باتری قابل شارژ هستند که در بسیاری از این وسایل امکان شارژ به صورت اتصال مکانیکی وجود ندارد. سیستم های الکترونیکی غیر قابل دسترسی خصوصاً در حوزه مهندسی پزشکی مانند قلب مصنوعی و وسایلی که درون بدن استفاده می شود و همچنین در حوزه های مختلف مانند سنسور های به کار گرفته در مخازن که نمی توان به صورت مستقیم با آنها ارتباط برقرار کرد نیازمند یک سیستم انتقال قدرت به صورت بیسیم برای منبع تغذیه آنها هستند (کیم و همکاران، ۲۰۰۱).

تقاضای استفاده از سیستم هایی با قابلیت تغذیه بدون سیم مستلزم کار بر روی سیستم های انتقال قدرت بیسیم (WPT) و همچنین نیازمند درک عمیقی از قواعد حاکم بر سیستم های الکتریکی می باشد؛ لذا با توجه به نیازی که وجود دارد باید روش مناسبی برای انتقال قدرت صورت گیرد. در بعضی از موارد، انتقال قدرت به صورت معمولی کار غیر ممکن و یا پرهزینه ای است (زاهد و همکاران، ۲۰۱۴). به عنوان مثال برای تغذیه یک سنسور که درون یک مخزن به کار گرفته و غیر قابل دسترسی است باید از یک سیستم WPT استفاده کرد.

از دیدگاه انتقال بیسیم قدرت، IoT قادر است تا سرویس هایی را برای حس یابی، راه اندازی، انتقال داده و پردازش اطلاعاتی بلادرنگ فراهم کند (جیانگ و همکاران، ۲۰۱۶). این قضیه به این علت است که "اشیا یی" همانند سیستم WPT و مرکز کنترل عموماً در فاصله دوری قرار دارند. برای مثال، مدار های القائی در یک سیستم WPT در بخش پایانی / شاهره مصرف کننده قرار دارند، در حالی که مرکز کنترل از نظر جغرافیایی در حاشیه قرار گرفته است؛ بنابراین، برای انتقال داده راه دور، شبکه های ارتباطی دیجیتال همانند بافت سلولی، فیبر

۱. نشان دادن سیستم WPT شامل مدارهای القایی با یک معادله خطی فضایی به صورتی که سنسورهای هوشمند به منظور به دست آوردن اندازه ها گسترش یابند؛

۲. ارائه یک IoT نوآورانه مبتنی بر زیر ساخت ارتباطی که ارتباطی دوطرفه را بین سیستم های WPT و مرکز کنترل فراهم می کند؛

۳. ارائه KF مبتنی بر تخمین حالت و کنترلر فیدبک بهینه در زمینه سیستم های WPT؛

۴. استفاده از شبیه سازی جهت بررسی میزان صحت تخمین و حالت های سیستم توسط روش پیشنهادی.

۲. چارچوب نظری و پیشینه تحقیق

سیستم انتقال قدرت بیسیم: امروزه سیستم های انتقال قدرت با استفاده از سیم تقریباً تمام جهان را به تسخیر خود درآورده اند. یک دغدغه مهم برای دانشمندان در حال حاضر توسعه سیستم های انتقال قدرت بدون استفاده از سیم و کابل می باشد. اگرچه این توانایی برسیم که بتوانیم سیم کشی ها را در محدوده هایی چندمتری حذف کنیم، نظاره گر تحول بزرگی در صنعت و زندگی روزمره خود خواهیم بود. فرایند انتقال قدرت بدون استفاده از سیم به این صورت است که انرژی الکتریکی از یک منبع برق به یک بار الکتریکی (امپدانس) بدون اتصال سیم منتقل می شود (مو و سون، ۲۰۱۵).

سیستم انتقال قدرت بی سیم در مواقعی که نیاز به انتقال انرژی آبی و مداوم باشد، سودمند است درحالی که سیم های انتقال نامناسب و پر خطر بوده و در بعضی موارد استفاده از آنها غیرممکن است. انتقال قدرت بی سیم می تواند در توان بالا، توان متوسط یا توان پایین کاربرد داشته باشد. کاربردهای توان بالا شامل مواردی مثل شارژ اتوبوس های مسافربری می باشد. محدوده توانی در این موارد تقریباً حدود چند ده کیلووات می باشد. کاربردهای توان متوسط شامل محدوده توانی پایین تر و تقریباً حدود چند کیلووات می باشد. این گونه سیستم ها مناسب برای شارژ خودروهای برقی می باشند و کاربردهای توان پایین

شوند. یک مثال از ارتباط بیسیم بین دستگاه های هوشمند پیرامون بدن انسان همانند هدست های بیسیم، دستگاه های پوشیدنی و شارژ بیسیم برای تلفن های هوشمند است. اساساً، تخمین حالت، فرایندی به منظور شناخت شرایط عملکرد سیستم است (هو و همکاران، ۲۰۱۶) و به دنبال آن کنترلرها نیاز به طراحی شدن برای عملیات مناسب و حفظ پایداری شبکه را دارند (رانا و همکاران، ۲۰۱۷). الگوریتم های متعددی برای تخمین حالت سیستم WPT و تثبیت وجود داشته است. الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF) برای تخمین حالت سیستم WPT در این پژوهش پیشنهاد شده است (لی و همکاران، ۲۰۱۰). در این چارچوب، سیستم WPT به عنوان یک معادله غیرخطی فضای حالت توصیف می شود، به صورتی که EKF به منظور تخمین حالت های سیستم مورد استفاده قرار می گیرد. برای تثبیت حالت های سیستم WPT، رگولاتور درجه دوم خطی (LQR) پذیرفته شده است.

در این پژوهش به پیشنهاد یک KF مبتنی بر تخمین حالت سیستم WPT و کنترلر فیدبک بهینه پرداخته شده است. به طور کلی در پژوهش حاضر به مسائل زیر پرداخته می شود:

سیستم WPT که مدارهای القایی را شامل می شود، با یک معادله خطی فضایی نشان داده می شود، به صورتی که سنسورهای هوشمند به منظور به دست آوردن اندازه ها گسترش می یابند. این مدل برای تخمین متغیرهای حالت WPT و طراحی کنترلر مفید است. یک IoT نوآورانه مبتنی بر زیر ساخت ارتباطی پیشنهاد می شود که ارتباطی دوطرفه را بین سیستم های WPT و مرکز کنترل فراهم می کند. باتکیه بر شبکه طراحی شده IoT، KF مبتنی بر تخمین حالت و کنترلر فیدبک بهینه در زمینه سیستم های WPT پیشنهاد شده است. از شبیه سازی جهت بررسی میزان صحت تخمین و حالت های سیستم توسط روش پیشنهادی در پژوهش استفاده شده است. همچنین اهداف پژوهش به صورت زیر می باشد:

شامل مواردی از قبیل مصارف پزشکی یا خانگی می‌باشند (شدید و نوقانیان، ۲۰۱۸).

اینترنت/اشیا: اینترنت اشیا یک فناوری جدید و مدرن می‌باشد که توسط آن هر موجودیت شامل انسان، اشیا و... توانایی ارسال داده به‌وسیله شبکه‌های ارتباطی، اعم از اینترنت یا اینترنت را خواهد داشت. فرایند ارسال داده‌ها در فناوری اینترنت اشیا بدین صورت است که به موضوع موردنظر یک شناسه‌ی یکتا و یک پروتکل اینترنتی تعلق می‌گیرد و به پایگاه‌داده مربوطه ارسال می‌گردد. داده‌هایی که توسط ابزارهای مختلف از قبیل گوشی‌های تلفن همراه و انواع رایانه‌ها و تبلت‌ها قابل مشاهده خواهند بود (سینگ و همکاران، ۲۰۱۴).

تخمین حالت: یکی از مهم‌ترین مسائل در حوزه‌های مختلف تخمین حالت سیستم‌های دینامیکی و تصادفی، است و حل مسائل مختلف، نهایتاً به حل یک مسئله تخمین حالت ختم می‌شود. برخی مسائل مرتبط با تخمین حالت، مانند هموارسازی با کاربردهای عملی فراوان تعریف‌پذیرند که اشتراکات فراوانی با موضوع تخمین حالت دارند. متغیرهای درونی یک سیستم دینامیکی که غالباً در مدل‌ها به‌صورت مؤلفه‌های بردار حالت ظاهر می‌شوند، اغلب به‌صورت کامل قابل اندازه‌گیری نیستند و می‌بایست با روشی مناسب، مقادیر آنها، تخمین زده شود. کاربرد مستقیم روش‌های تخمین حالت، در طراحی کنترل‌کننده‌های مبتنی بر فیدبک حالت است و از آنجاکه به دلایل مختلفی، متغیرهای حالت سیستم به‌صورت مستقیم قابل اندازه‌گیری نیستند، در طراحی کنترل‌کننده‌های مبتنی بر فیدبک حالت، روش‌های تخمین حالت نقشی بسیار مهم و اساسی را دارند. از این نظر، روش‌های تخمین حالت، عملاً توسعه‌یافته رویت گره‌های حالت هستند؛ با این تفاوت که قابل استفاده برای سیستم‌ها و فرایندهای اتفاقی و تصادفی می‌باشند (یون، ۲۰۱۰).

الگوریتم فیلتر کالمن: فیلتر کالمن که به‌عنوان تخمین خطی مرتبه دوم نیز از آن یاد می‌شود، الگوریتمی است که حالت یک سیستم پویا را با استفاده از مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌های شامل خطا در طول زمان برآورد می‌کند. این فیلتر معمولاً

تخمین دقیق‌تری را نسبت به تخمین بر مبنای یک اندازه‌گیری واحد را بر مبنای استنباط بیزی و تخمین توزیع احتمال مشترکی از یک متغیر تصادفی در یک مقطع زمانی ارائه می‌کند. این فیلتر از نام رودولف ای کالمن، یکی از پایه‌گذاران این تئوری گرفته شده است. این الگوریتم در دو گام اجرا می‌شود. در گام پیش‌بینی، فیلتر کالمن تخمینی از وضعیت فعلی متغیرها را در شرایط عدم قطعیت ارائه می‌کند. زمانی که نتیجه اندازه‌گیری بعدی به دست آید، تخمین قبلی با میانگین وزن‌دار به‌روزرسانی می‌شود. به این ترتیب که وزن اطلاعاتی که دارای قطعیت بیشتری هستند، بیشتر خواهد بود. الگوریتم بازگشتی می‌باشد و با استفاده از ورودی‌های جدید و حالات محاسبه شده قبلی به‌صورت بی‌درنگ اجرا می‌شود (سینقال و وو، ۱۹۸۹).

در ادامه به برخی پژوهش‌های صورت گرفته در راستای پژوهش صورت گرفته ارائه شده است:

در راستای توسعه سیستم‌های انتقال قدرت بی‌سیم، پژوهش‌های متعددی انجام شده است که هر یک به جنبه‌ای از این فناوری پرداخته‌اند. فیدل و همکاران (۲۰۱۹) مدلی از سیستم انتقال قدرت بی‌سیم را برای کنترل موقعیت گیرنده نسبت به فرستنده جهت دستیابی به حداکثر بهره‌وری ارائه دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که کنترل موقعیت بین فرستنده و گیرنده، به‌ویژه هم‌ترازی زاویه‌ای، تأثیر بسزایی بر عملکرد نهایی انتقال دارد. راه‌حل پیشنهادی آن‌ها زمان لازم برای تأمین قدرت را کاهش داد که به‌طور ضمنی منجر به مصرف انرژی کمتر در مراحل اولیه می‌شود. همچنین، آن‌ها نشان دادند که شناسایی این روش کنترل موقعیت در استفاده از دستگاه‌های کنترل‌کننده فاکتور انسانی مفید است، زیرا می‌توانند موقعیت را بر اساس کنترل نور تطبیق دهند.

در پژوهشی دیگر، مینرت و استیون (۲۰۱۸) به تعیین بار مطلوب برای یک سیستم WPT مختلط با توپولوژی سری پرداختند. آن‌ها نشان دادند که مقاومت غیرصفر برای جبران امپدانس ورودی پیچیده سیستم ضروری است. محاسبات

طراحی شد. نقشه بودی تابع انتقال حلقه با حاشیه فاز و فرکانس تقاطع موردنظر ترسیم گردید. کنترلر مشتق شده در PSIM و همچنین در اجرای سخت‌افزاری مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج مطلوبی را نشان داد.

در نهایت، زهید و همکاران (۲۰۱۵) روشی دقیق برای مدل‌سازی بر اساس توابع توصیف گسترده برای یک سیستم WPT جبران سری ارائه کردند. آن‌ها ابتدا مدل متوسط سیگنال بزرگ را به دست آوردند که قادر بود پکت شکل موج‌های سوئیچینگ را در طول نقطه عملیاتی پایدار و همچنین در هنگام گذر پیش‌بینی کند. این مدل با مقایسه شکل موج‌های سوئیچینگ اندازه‌گیری شده با پکت پیش‌بینی شده توسط مدل سیگنال بزرگ، به صورت تجربی تأیید شد. سپس، مدل حالت پایدار حاصل شد که توانست منحنی افزایش ولتاژ و منحنی افزایش جریان را برای مبدل در هرگونه شرایط بار و خط پیش‌بینی کند. این مدل نیز با مقایسه منحنی افزایش ولتاژ از داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده با منحنی سود پیش‌بینی شده از مدل مشتق شده، به صورت تجربی تأیید گردید. در نهایت، مدل سیگنال کوچک با زمان مداوم به صورت بسته به دست آمد که شامل هم کنترلر فرکانس و هم کنترل تغییر فاز بود و می‌توانست برای استخراج کلیه عملکردهای انتقال مبدل مورد استفاده قرار گیرد.

۳. روش تحقیق

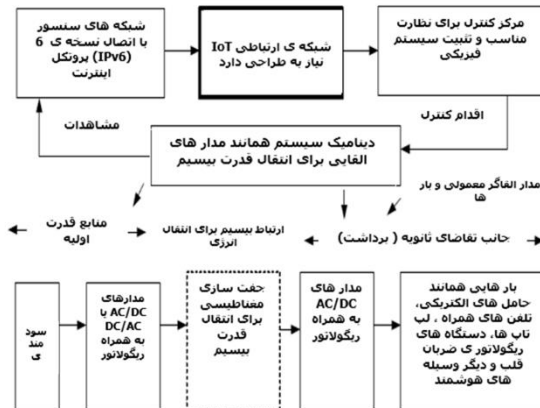
در این پژوهش ابتدا طراحی یک مدل فضای حالت از سیستم‌های بیسیم انتقال قدرت (WPT) ارائه شده است. فضای حالت مذکور به منظور استفاده برای هدف تخمین حالت و طراحی کنترلر که شبکه‌های ارتباطی اینترنت اشیا (IoT) را مطرح می‌سازد، ارائه شده است. پس از مشخص ساختن سیستم‌های WPT به یک معادله خطی فضای حالت، المان‌های IoT همانند سنسورها به منظور به دست آوردن اطلاعات حالت، گسترش می‌یابند. سپس، یک IoT نوآورانه مبتنی بر زیرساخت ارتباطی برای حس یابی، راه‌اندازی، و

تحلیلی آن‌ها که حداکثر انتقال قدرت دست‌یافت را به عنوان مرجعی برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های WPT مختلط ارائه می‌کرد، توسط شبیه‌سازی عددی SPICE تأیید شد. راه‌حل پیشنهادی آن‌ها به عنوان گامی اولیه در جهت توصیف دقیق نظریه اتصال برای کاربردهای WPT مختلط مطرح گردید. با این حال، آن‌ها تأکید کردند که آزمایش‌های دقیق‌تری بر روی این سیستم‌ها ضروری است تا تأیید شود آیا این مدل ساده، توضیحی دقیق از واقعیت ارائه می‌دهد، به‌ویژه در بازسازی خازن‌های جفت شده در سری با سلف‌های همراه.

وانگ و همکاران (۲۰۱۷) روشی مبتنی بر تقویت Q را برای بهبود ضریب کیفیت کوپل‌ها در یک جفت القای رزونانس سیستم انتقال قدرت بی‌سیم ارائه کردند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها با نتایج محاسباتی مطابقت خوبی داشت و این روش برای استاندارد A4WP قابل اجرا بود. سیستم WPT پیشنهادی آن‌ها، به‌ویژه در فواصل انتقال بیش از قطر سیم‌پیچ، توانست قدرت و بازده انتقال را به‌طور هم‌زمان افزایش دهد. تان و هانگ (۲۰۱۷) نیز روش بهینه‌سازی سیستمی را بر اساس WPT همراه با رزونانس مغناطیسی ارائه دادند. بر اساس تحلیل آن‌ها، با تنظیم تعداد دوره‌های گیرنده می‌توان به بهینه‌سازی سیستم دست‌یافت. آزمایش‌های مختلفی برای تأیید تحلیل نظری آن‌ها انجام شد که روش پیشنهادی را تأیید کرد.

ویلیامسون و همکاران (۲۰۱۶) به مدل‌سازی سیگنال کوچک از حالت بسته متقارن کنترل شده سری در توپولوژی انتقال قدرت القایی با استفاده از مفهوم تابع توصیف پرداختند. در پژوهش آن‌ها، مدار معادل توپولوژی سری باتوجه به سوئیچینگ ولتاژ صفر در سوئیچ‌های اینورتر به دست آمده بود. مدل سیگنال کوچک آن‌ها شامل ولتاژ ورودی، کنترلر فرکانس و چرخه وظیفه بود. برای تأیید مدل سیگنال کوچک، یک کنترل کننده حلقه ولتاژ در ابزار طراحی SISO MATLAB با استفاده از تابع انتقال به دست آمده از مدل سیگنال کوچک

بسیار زیادی داده را از مکان‌ها و طی زمان‌های مختلف تولید می‌کند. متأسفانه، ارتباط خطی قدرت، به دلیل نرخ انتقال پایین و محدودیت پهنای باند، قادر به به‌کارگیری مقدار عظیمی از اطلاعات به‌صورت مؤثر نیست.

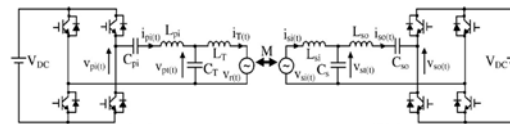


شکل ۳- سیستم بیسیم انتقال قدرت و شبکه هوشمند

در نتیجه، بهتر است سیستم اتوماسیون صنعتی تبدیل به سیستم هوشمند مبتنی بر IOT شود. به‌منظور نظارت اشیا، اطلاعات حس‌یابی نیاز به انتقال به مرکز کنترل موجود بر روی شبکه‌های ارتباطی را دارند. این قضیه به‌این‌علت است که "اشیایی" همانند سیستم WPT و مرکز کنترل عموماً در فاصله دوری قرار دارند. برای مثال، مدارهای القائی در یک سیستم WPT در بخش پایانی/شاهراه مصرف‌کننده قرار دارند، درحالی‌که مرکز کنترل از نظر جغرافیایی در حاشیه قرار گرفته است؛ بنابراین، برای انتقال داده راه دور، شبکه‌های ارتباطی دیجیتال و اینترنت ممکن است عملکرد سیستم را بهبود بخشد.

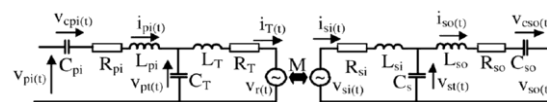
معمولاً، سنسورها قابلیت‌های ارتباطی محدودی را دارا هستند؛ بنابراین، قادر به ارسال راه دور اطلاعات حس‌یابی نیستند. برای مثال، سیستم مدیریت انرژی از نظر جغرافیایی در فاصله دوری از سیستم‌های WPT قرار دارند. در نتیجه، نیاز به یک زیر ساخت ارتباطی مناسب خواهد داشت که ارتباطی دوطرفه را بین آن‌ها ایجاد می‌کند. این پژوهش به پیشنهاد یک IoT مبتنی بر زیر ساخت ارتباطی نوآورانه برای سیستم WPT پیشنهادی پرداخته است.

ارسال اطلاعات به سمت مرکز کنترل پیشنهاد خواهد شد: به‌منظور شناخت شرایط عملکرد سیستم‌های WPT، فیلتر کالمن مبتنی بر الگوریتم تخمین حالت دینامیک، کنترلر بهینه به‌منظور تنظیم حالت‌های سیستم طراحی شده است. دیگرام بلاک مدل مفهومی سیستم بیسیم انتقال قدرت و مدار معادل آن به ترتیب در شکل‌های (۱) و (۲) نمایش داده شده‌اند. در فضای حالت سیستم پیشنهادی جانب اولیه و ثانویه به‌وسیله یک شکاف هوا جدا شده‌اند. انرژی می‌تواند بر روی شکاف از طریق جفت القائی بین پیچک‌های القاگر منتقل شود. به دلیل شکاف هوا، القاکنایی نشتی بسیار بزرگ‌تر از القای مغناطیسی کننده است.



شکل ۱- دیگرام بلاک مفهومی سیستم بیسیم انتقال قدرت پیشنهادی

به‌منظور جبران القاکنایی نشتی، خازن‌ها به هر دو جانب پیچک‌ها اضافه می‌شوند. میدل پل کامل در جانب اولیه در حال تبدیل ولتاژ DC ورودی به یک موج مربعی است، درحالی‌که دیودهای یک سو کنندگی در جانب ثانویه در حال تبدیل ولتاژ AC به ولتاژ DC است. هر دوی معکوس‌کننده و دیودها توسط مدار مخزن رزونان جدا می‌شوند.



شکل ۲- نمایش مدار معادل سیستم پیشنهادی

جانب اولیه مدار به شبکه متصل شده است که به‌وسیله سیستم مدیریت انرژی برای عملکرد مناسب و ثبات نظارت شده‌اند. جانب ثانویه قادر است تا انرژی را به‌وسیله‌هایی همانند حامل‌های الکتریکی، تلفن‌های همراه، دستگاه‌های رگولاتور ضربان قلب تحویل دهد.

به‌طورکلی، مدارهای القائی برای سیستم‌های بیسیم انتقال قدرت همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، به شبکه هوشمند متصل شده‌اند. اساساً، این شبکه به‌صورت مداوم مقدار

۴. یافته‌ها

دیگرام بلاک تنظیم شبیه‌سازی در فصل قبل و در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص شده، می‌توان مشاهده کرد زیر ساخت پیشنهاد شده، ارتباطی دوطرفه را بین سیستم‌های WPT و مرکز کنترل ایجاد می‌کند که سبب انتقال اطلاعات به‌صورت Real Time و یا به عبارت دیگر، Baud Rate انتقال داده (نرخ تبادل اطلاعات) را به اندازه‌ای رسانده که سیکل زمانی شبکه از کمترین زمان لازم برای تغییر اطلاعات، کمتر باشد. همچنین امکان Plug & Play وجود دارد. امکان ایجاد توپولوژی‌های مختلف شبکه، باس در شبکه‌های صنعتی وجود دارد و در نهایت شبکه به‌صورت باز می‌باشد، یعنی امکان سازگاری با شبکه IOT وجود دارد. عامل‌های شبیه‌سازی و مقادیر محاسبه شده، در جدول (۱) خلاصه شده‌اند:

جدول ۵- نحوه شکل‌گیری زنجیره اصلی و بلاک‌های جانبی در بلاک‌چین

نشانه‌ها	مقادیر	نشانه‌ها	مقادیر
R_{pi}	0.0152Ω	R_T	0.0158Ω
R_{si}	0.0179Ω	R_{so}	0.0122Ω
c_{so}	$2.5329 \times 10^{-3}F$	C_s	$2.47 \times 10^{-3}F$
c_{pi}	$2.5307 \times 10^{-3}F$	L_{so}	$46.28 \times 10^{-3}H$
L_{si}	$32.48 \times 10^{-3}H$	L_T	$22.84 \times 10^{-3}H$
L_{pi}	$46.51 \times 10^{-3}H$	C_T	$2.49 \times 10^{-3}F$
M	$8 \times 10^{-3}H$	Q	$0.0005I$
R	$0.05I$	ΔT	0.0001

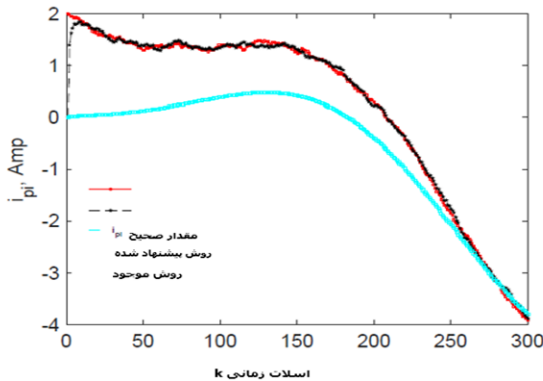
منبع: یافته‌های پژوهش

مقادیر هریک از نشانه‌ها در جدول بالا بیانگر مفاهیم خاصی می‌باشد که در ادامه به تشریح آن پرداخته شده است:

- مقدار R_{si} اندازه‌گیری شده، نشان‌دهنده میزان مقاومت در مدار RLC جانبی ثانویه می‌باشد.
- مقدار C_{so} اندازه‌گیری شده، نشان‌دهنده میزان ظرفیت خازن در مدار RLC جانبی ثانویه می‌باشد.
- مقدار C_{pi} اندازه‌گیری شده، نشان‌دهنده میزان ظرفیت خازن در مدار RLC جانبی اولیه می‌باشد.
- مقدار L_{si} اندازه‌گیری شده، نشان‌دهنده میزان ضریب القا در مدار RLC جانبی ثانویه می‌باشد.
- مقدار L_{pi} اندازه‌گیری شده، نشان‌دهنده میزان ضریب القا در مدار RLC جانبی اولیه می‌باشد.
- مقدار M بین پیچک اولیه و ثانویه می‌باشد.
- مقدار R اندازه‌گیری شده، نشان‌دهنده میزان مقاومت بین پیچک اولیه و ثانویه می‌باشد.
- مقدار R_T اندازه‌گیری شده، نشان‌دهنده میزان مقاومت جانبی اولیه می‌باشد.
- مقدار R_{so} اندازه‌گیری شده، نشان‌دهنده میزان مقاومت در مدار RLC جانبی اولیه می‌باشد.
- مقدار C_s اندازه‌گیری شده، نشان‌دهنده میزان برداشت خازن جانبی می‌باشد.
- مقدار L_{so} اندازه‌گیری شده، نشان‌دهنده میزان ضریب القا در مدار RLC جانبی ثانویه می‌باشد.
- مقدار L_T اندازه‌گیری شده، نشان‌دهنده میزان القاگر جانبی اولیه می‌باشد.
- مقدار C_T اندازه‌گیری شده، نشان‌دهنده میزان خازن جانبی اولیه می‌باشد.
- مقدار Q اندازه‌گیری شده، نشان‌دهنده میزان ماتریس خطای حالت سیستم می‌باشد.
- مقدار ΔT اندازه‌گیری شده، نشان‌دهنده دوره نمونه‌برداری می‌باشد.

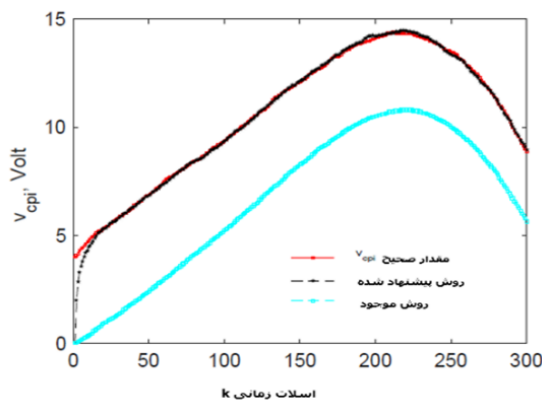
- مقدار R_{pi} اندازه‌گیری شده، نشان‌دهنده میزان مقاومت در مدار RLC جانبی اولیه می‌باشد.

است تا به صورت مؤثر خطاهای تخمین $\dot{I}_T$ کنونی در سرتاسر القاگر L_T را کاهش دهد درحالی که رویکرد چهارم حداقل مربع میانگین موجود به دلیل طبیعت زیر بهینه بیان بهره، به سستی بهره بهینه را می یابد.



شکل ۵- $\dot{I}_{pi}$ کنونی به واسطه القاگر اولیه L_{pi} و نتیجه تخمین آن.

شکل (۵) نشان دهنده $\dot{I}_{pi}$ کنونی در سرتاسر القاگر L_{pi} و نتیجه تخمین آن است. در این شکل نیز واضح است که طرح پیشنهاد شده نیاز به ۲۰ مرحله زمانی دارد، درحالی که رویکرد موجود نیاز به ۳۰۰ مرحله زمانی دارد. دلیل این اتفاق این است که بهره بهینه پیشنهادی به صورت مؤثر خطاهای تخمین $\dot{I}_{pi}$ کنونی در سرتاسر القاگر L_{pi} را کاهش می دهد.



شکل ۶- V_{cpi} کنونی به واسطه القاگر اولیه L_{pi} و نتیجه تخمین آن.

شکل (۶) تخمین حالت V_{cpi} کنونی در سرتاسر القاگر L_{pi} را نشان می دهد. با توجه به شکل می توان دریافت که طرح پیشنهاد شده نیاز به مرحله زمانی کمتری به نسبت رویکرد موجود به دلیل کاهش خطاهای تخمین V_{cpi} کنونی در

در ادامه با استفاده از فرمول ها و روش های ارائه شده در فصل قبل و مقادیر به دست آمده بالا به تخمین موارد زیر پرداخته شده است:

➤ $\dot{I}_{pi}$ کنونی به واسطه ی القاگر اولیه L_{pi}

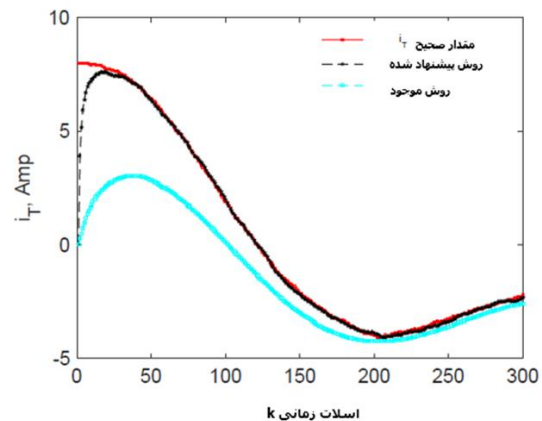
➤ v_{cpi} ولتاژ بر روی خازن جانبی اولیه C_{pi}

➤ $\dot{I}_T$ کنونی به واسطه ی القاگر جانبی اولیه L_T

➤ $\dot{I}_{so}$ ولتاژ بر روی برداشت خازن خروجی L_{so}

در بخش بعدی تجزیه و تحلیل نتایج شبیه سازی و میزان صحت تخمین روش پیشنهادی در این پژوهش به صورت کامل شرح داده شده است.

تجزیه و تحلیل نتایج شبیه سازی: پاسخ های دینامیک سیستم WPT در شکل های (۴) تا (۸) نشان داده شده است. می توان مشاهده کرد که پاسخ های حالت WPT تخمین زده شده، به عنوان اقدامات زمانی، تبدیل به مقادیر حالت واقعی می شوند. همچنین می توان مشاهده کرد که الگوریتم پیشنهاد شده، رویکرد چهارم حداقل مربع میانگین موجود را بهبود می بخشد.



شکل ۷- $\dot{I}_T$ کنونی به واسطه القاگر جانبی اولیه L_T و نتیجه تخمین آن.

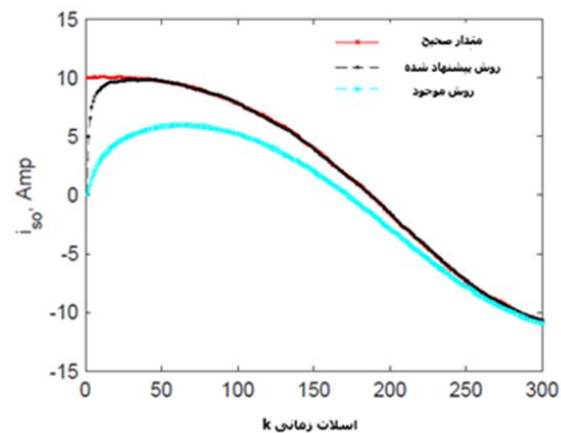
شکل (۴) نشان دهنده $\dot{I}_T$ کنونی در سرتاسر القاگر L_T و نتیجه تخمین آن است. به صورت آشکار می توان مشاهده کرد که طرح پیشنهاد شده نیاز به ۴۰ مرحله زمانی دارد، درحالی که رویکرد موجود نیاز به ۳۰۰ مرحله زمانی دارد. این قضیه به دلیل این واقعیت اتفاق می افتد که بهره بهینه طراحی شده قادر

زمانی اندک تثبیت کند. به عبارت دیگر، روش پیشنهاد شده نیاز به مرحله زمانی $k=1300$ برای تثبیت حالت دارد. در حالتی که روش موجود نیازمند $K=1500$ مرحله زمانی دارد. روش پیشنهادی میزان خطای تخمین و تثبیت را کاهش داده و در نتیجه مرحله زمانی تخمین کاهش پیدا کرده و بهره‌وری سیستم افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در این بخش مشاهده شد با استفاده از شبیه‌سازی توانستیم میزان صحت تخمین و حالت‌های سیستم توسط روش پیشنهادی در پژوهش را بررسی کرده و مورد تجزیه و تحلیل قرار دهیم. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی در این پژوهش جهت تثبیت حالت سیستم، نیازمند مرحله زمانی کمتری به نسبت سایر روش‌های موجود می‌باشد که موجب بهره‌وری هر چه بیشتر سیستم می‌شود. همچنین با استفاده از رویکرد تخمین پیشنهادی در این روش میزان خطای تخمین نیز کاهش یافته است و این مسئله نیز موجب بالارفتن بهره‌وری سیستم شده است. رویکردهای پیشنهاد شده در این پژوهش قادر هستند تا به درستی حالت‌های WPT را تخمین و تثبیت کنند.

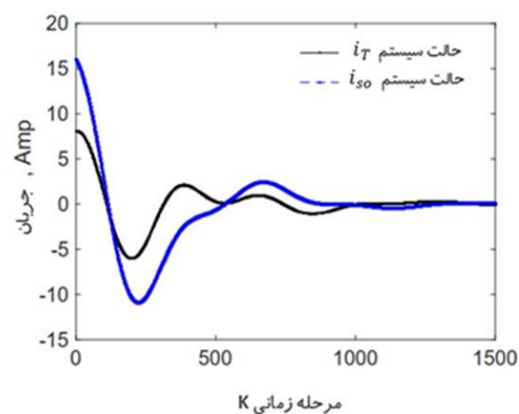
استفاده از زیرساخت IOT پیشنهادی نیز با استفاده از ارتباط غیرخطی قدرت، نرخ انتقال بالا و پهنای باند مناسب، قادر به به‌کارگیری مقدار عظیمی از اطلاعات به صورت مؤثر شده است که سبب بالارفتن بهره‌وری سیستم WPT می‌شود. همچنین طرح مدولاسیون دیجیتال برای انتقال دیجیتال راه دور مورد استفاده در سیستم و گسترش مجموعه‌ای از سنسورها و همچنین کوانتومی کردن اطلاعات حس یابی برای به‌دست‌آوردن اطلاعات بیتی همگی موجب بالارفتن کارایی سیستم پیشنهادی شده‌اند؛ بنابراین چارچوب‌های توسعه یافته در طراحی IoT مبتنی بر مرکز کنترل هوشمند، برای سیستم‌های WPT بارزش هستند.

سرتاسر القاگر L_{pi} دارد. روش پیشنهادی رویکرد چهارم حداقل مربع میانگین موجود را نیز بهبود بخشیده است.



شکل ۷- i_{SO} کنونی به واسطه القاگر اولیه LSO و نتیجه تخمین آن.

شکل (۷) نشان‌دهنده i_{SO} کنونی به واسطه القاگر L_{SO} و نتیجه تخمین آن است. یا توجه به شکل می‌توان مشاهده کرد که طرح پیشنهاد شده نیاز به ۵۰ مرحله زمانی دارد، درحالی‌که رویکرد موجود نیاز به ۳۰۰ مرحله زمانی دارد. مسئله مطرح شده نشان‌دهنده این است که بهره بهینه طراحی شده قادر است تا به صورت مؤثر خطاهای تخمین i_{SO} کنونی به واسطه القاگر L_{SO} را کاهش دهد.



شکل ۸- کنترل جریان‌های حالت i_T و i_{SO}

از طریق شکل (۸) پس از اعمال کنترلر پیشنهاد شده که در فصل قبل به طور کامل تشریح شده می‌توان مشاهده کرد که رویکرد پیشنهادی می‌تواند حالت‌های سیستم را در مراحل

۵. بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش به استخراج یک مدل فضای حالت از سیستم‌های بیسیم انتقال قدرت (WPT) به منظور استفاده برای هدف تخمین حالت و طراحی کنترلر که شبکه‌های ارتباطی اینترنت اشیا (IoT) را مطرح می‌سازد، پرداخته شده است. پس از مشخص ساختن سیستم‌های WPT به یک معادله خطی فضای حالت، المان‌های IoT همانند سنسورها به منظور به دست آوردن اطلاعات حالت، گسترش یافتند. سپس، یک IoT نوآورانه مبتنی بر زیرساخت ارتباطی برای حس یابی، راه اندازی، و ارسال اطلاعات به سمت مرکز کنترل پیشنهاد شد: به منظور شناخت شرایط عملکرد سیستم‌های WPT، فیلتر kalman مبتنی بر الگوریتم تخمین حالت داینامیک، کنترلر بهینه به منظور تنظیم حالت‌های سیستم طراحی شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که رویکردهای پیشنهاد شده قادر هستند تا به درستی حالت‌های WPT را تخمین و تثبیت کنند. دستاوردهای پژوهش در ادامه به طور واضح بیان شده اند:

- سیستم WPT شامل مدارهای القایی با یک معادله خطی فضایی به صورتی در این پژوهش طراحی شد که سنسورهای هوشمند به منظور به دست آوردن اندازه ها گسترش یافتند و بهره‌وری سیستم WPT را بهبود بخشیده‌اند.
- طرح مدولاسیون دیجیتال برای انتقال دیجیتال راه دور مورد استفاده در سیستم و کوانتومی کردن اطلاعات حس یابی برای به دست آوردن اطلاعات بیتی موجب بالا رفتن کارایی سیستم پیشنهادی شده‌اند.
- IoT نوآورانه مبتنی بر زیر ساخت ارتباطی ارائه شده در این پژوهش ارتباطی دوطرفه را بین سیستم‌های WPT و مرکز کنترل فراهم کرده است.

- KF مبتنی بر تخمین حالت و کنترلر فیدبک بهینه در زمینه سیستم‌های WPT سبب صحت و دقت بیشتر تخمین حالت در این پژوهش شده است.
 - استفاده از رویکرد تخمین پیشنهادی در این روش میزان خطای تخمین را کاهش داده و این مسئله موجب بالا رفتن بهره‌وری سیستم شده است.
- این پژوهش می‌تواند به عنوان یک مرحله برای پژوهش‌های آتی پیرامون شبکه سازی ارتباطی IoT و همچنین اطلاعات بیسیم و ارتباطات انتقال قدرت به کار رود. اگر چه مدل سیستم پیشنهاد شده و الگوریتم‌های پژوهش حاضر برای کاربردهای WPT مفید هستند، اما پژوهش‌های بعدی می‌توانند در بردارنده جنبه‌های زیر باشند:
- مطرح ساختن تأخیر متفاوت زمانی القا شده شبکه بندی شده
 - استفاده از یک الگوریتم کنترلی انطباقی به منظور به دست آوردن عملکرد بهتر در پژوهش‌های آتی
- با وجود دستاوردهای ارزشمند، این پژوهش محدودیت‌هایی نیز دارد که باید در تفسیر نتایج در نظر گرفته شوند. نخست آنکه مدل فضای حالت ارائه شده برای سیستم WPT، یک مدل خطی است و ممکن است در شرایط عملیاتی شدید یا تغییرات ناگهانی بار، تمامی دینامیک‌های غیرخطی سیستم را به طور کامل پوشش ندهد. دوم، در مدل سازی شبکه ارتباطی IoT، فرضیات ساده سازی شده‌ای در نظر گرفته شده است و تأثیرات مخرب شبکه‌ای نظیر تأخیرهای متغیر زمانی، ازدست رفتن بسته‌های داده و محدودیت‌های انرژی سنسورها به طور کامل در طراحی کنترل کننده و تخمین گر لحاظ نگردیده است. همچنین، ملاحظات امنیتی و سایبری در انتقال داده‌های حساس سیستم‌های متصل به شبکه هوشمند در این مطالعه مورد بررسی قرار نگرفته است.

فهرست منابع

- Dama, S., Sathya, V., Kuchi, K., & Pasca, T. V. (2016). *A feasible cellular Internet of Things: Enabling edge computing and the IoT in dense futuristic cellular networks*. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 6(1), 66-72.
- Fidel, A., et al. (2019). *Modeling of wireless power transfer system for receiver position control to achieve maximum efficiency*. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
- He, X., Ma, Y., & Mizutani, M. (2012). *Data transmission mechanism for multiple gateway system*. In *2012 6th International Conference on New Trends in Information Science, Service Science and Data Mining (ISSDM2012)* (pp. 98-101). IEEE.
- Hu, W., Wang, P., & Gooi, H. B. (2016). *Toward optimal energy management of microgrids via robust two-stage optimization*. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(2), 1161-1174. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2580666>
- Jiang, H., Wang, K., Wang, Y., Gao, M., & Zhang, Y. (2016). *Energy big data: A survey*. *IEEE Access*, 4, 3844-3861. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2598250>
- Kim, C. G., Seo, D. H., You, J. S., Park, J. H., & Cho, B. H. (2001). *Design of a contactless battery charger for cellular phone*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 48(6), 1238-1247. <https://doi.org/10.1109/41.966533>
- Li, X., Gong, Q. W., & Qiao, H. (2010). *The application of IOT in power systems*. *Power System Protection and Control*, 38(22), 232-236.

باتوجه به یافته‌ها و محدودیت‌های مطرح‌شده، پژوهش‌های آتی می‌توانند بر محورهای زیر متمرکز شوند:

۱. لحاظ کردن تأخیرهای متغیر زمانی و پدیده ازدست‌رفتن بسته‌های داده در شبکه‌های IoT و طراحی تخمین‌گرها و کنترل‌کننده‌های مقاوم برای جبران این اثرات در سیستم‌های WPT
 ۲. توسعه الگوریتم‌های کنترل انطباقی و مبتنی بر یادگیری ماشین برای مدیریت بهتر عدم قطعیت‌ها و دینامیک‌های غیرخطی سیستم‌های انتقال قدرت بی‌سیم در شرایط عملیاتی متغیر.
 ۳. بررسی جنبه‌های امنیتی و حریم خصوصی در زیرساخت‌های IoT متصل به شبکه هوشمند و ارائه چارچوب‌های رمزنگاری سبک برای محافظت از داده‌های ارسالی سنسورها.
 ۴. تعمیم مدل پیشنهادی به سیستم‌های WPT چند فرستنده - چند گیرنده و ارزیابی عملکرد الگوریتم تخمین حالت در مقیاس بزرگ‌تر و پیچیده‌تر.
- ملاحظات اخلاقی:** کلیه اصول اخلاق در پژوهش، همچنین امانت‌داری علمی در استفاده از منابع، استنادها و ارجاعات موردتوجه قرار گرفته و رعایت شده است.
- تعارض منافع:** نویسندگان اعلام می‌دارند که تدوین و انتشار این مقاله فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.
- سهم نویسندگان:** نگارش و تدوین مقاله به‌صورت مشترک و با مشارکت برابر تمامی نویسندگان انجام شده است.
- تشکر و قدردانی:** بدین‌وسیله از تمامی افرادی که در تهیه و تکمیل این مقاله همکاری و مساعدت داشته‌اند، قدردانی می‌شود.
- تأمین اعتبار پژوهش:** این پژوهش بدون دریافت هرگونه حمایت یا تأمین مالی انجام شده است.

- Singh, D., Tripathi, G., & Jara, A. J. (2014). *A survey of Internet-of-Things: Future vision, architecture, challenges and services*. In *2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT)* (pp. 287-292). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2014.6803175>
- Singhal, S., & Wu, L. (1989). *Training feed-forward networks with the extended Kalman algorithm*. In *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing* (pp. 1187-1190). IEEE.
- Swain, A. K., Devarakonda, S., & Madawala, U. K. (2014). *Modeling, sensitivity analysis, and controller synthesis of multipickup bidirectional inductive power transfer systems*. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(2), 1372-1380. <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2308733>
- Tan, X., & Hang, L. (2017). *System optimization method based on WPT with magnetic resonance*. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
- Wang, Y., et al. (2017). *A Q-boost method to improve the quality factor of coils in a resonant inductive coupling WPT system*. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
- Williamson, S. S., et al. (2016). *Small-signal modeling of symmetric closed-loop series compensated topology in inductive power transfer using describing function concept*. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
- Yoon, Y. J. (2010). *Study of the utilization and benefits of phasor measurement units for large scale power system state estimation* (Doctoral dissertation, Texas A&M University).
- Zahid, Z. U., Dalala, Z. M., Zheng, C., Chen, R., Faraci, W. E., Lai, J. S.,... & Minert, J., & Stephen, M. (2018). *Determination of optimal load for a hybrid WPT system with series topology*. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
- Mou, X., & Sun, H. (2015). *Wireless power transfer: Survey and roadmap*. In *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)* (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2015.7145888>
- Rana, M. M., Li, L., & Su, S. W. (2017). *Controlling the renewable microgrid using semidefinite programming technique*. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 84, 225-231. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.05.033>
- Roselli, L., Carvalho, N. B., Alimenti, F., Mezzanotte, P., Orecchini, G., Virili, M.,... & Pinho, P. (2014). *Smart surfaces: Large area electronics systems for Internet of Things enabled by energy harvesting*. *Proceedings of the IEEE*, 102(11), 1723-1746. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2354966>
- Roselli, L., Mariotti, C., Mezzanotte, P., Alimenti, F., Orecchini, G., Virili, M., & Carvalho, N. B. (2018). *Review of the present technologies concurrently contributing to the implementation of the Internet of Things (IoT) paradigm: RFID, Green Electronics, WPT and Energy*. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*.
- Shadid, R., & Noghianian, S. (2018). *A literature survey on wireless power transfer for biomedical devices*. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/8609603>

Anderson, D. (2014). Modeling and control of series-series compensated inductive power transfer system. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 3(1), 111-123. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2375255>

Zahid, Z. U., et al. (2015). Accurate modeling based on extended describing functions for a series compensated WPT system. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics.