فناوری زنجیره‌ی بلوکی و گسترش افق‌های شبکه‌ی توزیع فعال

فرگل نعمت‌خواه[1] فرخ امینی‌فر[2] محمد شاهیده‌پور[3]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران - تهران- ایران
fargol.nematkhah@ut.ac.ir

۲- دانشیار- دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران- ایران
faminifar@ut.ac.ir

۳- استاد- دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی ایلنوی- شیکاگو- آمریکا
ms@iit.edu

چکیده: تحولات اخیر در سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی نظیر نفوذ گسترده‌ی منابع انرژی توزیع شده به این سیستم‌ها موجب شده‌است تا بهره‌برداران با چالش‌های جدیدی مواجه شوند. گذار از مدیریت مرکزی به مدیریت غیرمتمرکز سیستم‌های توزیع از جمله تغییراتی است که به منظور ایجاد مطابقت با تحولات اخیر و بهبود عملکرد، تاب‌آوری و پایداری این سیستم‌ها ایجاد شده‌است. استفاده از اینترنت در قالب اینترنت اشیاء، نمونه‌ای از تغییرات در زمینه‌ی اطلاعاتی و فناوری در سیستم‌های توزیع می‌باشد که توانسته زمینه‌ی لازم برای تغییرات بهره‌برداری و مدیریتی یاد شده را فراهم آورد. فناوری زنجیره‌ی بلوکی با ساختار غیرمتمرکز خود، می‌تواند بستری امن برای مبادله‌ی اطلاعات از طریق اینترنت باشد که با مدیریت غیرمتمرکز سیستم‌های توزیع سازگاری کامل دارد. در این مقاله نخست به معرفی زنجیره‌ی بلوکی و توضیح نحوه‌ی کارکرد آن می‌پردازیم. سپس دگرگونی‌های سیستم‌های توزیع را که منجر به ایجاد سیستم توزیع فعال شده‌است مرور و عملکرد آن را تشریح می‌کنیم. در انتها جایگاه زنجیره-ی بلوکی به عنوان فناوری مناسب برای حفظ امنیت اطلاعات و حذف نهاد مرکزی در مدیریت سیستم توزیع فعال مورد بررسی قرار می‌گیرد و بازارهای انرژی نظیر به نظیر به عنوان سناریویی عملی از کاربردهای زنجیره‌ی بلوکی عنوان می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: زنجیره‌ی بلوکی، اینترنت اشیاء، قرارداد هوشمند، انرژی تراکنشی، بازار انرژی، شبکه‌ی هوشمند

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.1.23

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۴/۹
تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳
نام نویسنده‌ی مسئول: فرخ امینی‌فر
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – تهران –خیابان کارگر شمالی – پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران – دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

تغییر را می‌توان بخش اجتناب ناپذیری از تکامل هر سیستم دانست که موجب دوام آن می‌گردد. تغییرات باید توانایی پاسخگویی به نیازهای جدید کاربران سیستم را داشته و با مقتضیات برهه‌ای از زمان که سیستم مورد نظر در آن بهره‌برداری می‌شود سازگار باشند. بی‌شک آنچه بستر را برای تحقق تغییرات در خصوص هر سیستمی فراهم می‌آورد وجود فناوری‌های کارا می‌باشد.

در عصر دیجیتالی امروز، وابستگی به اینترنت به نحو فزاینده‌ای رو به رشد است و افراد روزانه از اینترنت برای تجارت، انجام تراکنش‌های مالی، استخراج اطلاعات و سایر موارد استفاده می‌کنند. بدیهی است که در چنین فضایی نیاز به حفظ حریم خصوصی افراد و امنیت اطلاعات اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند به طوریکه امنیت سایبری به دغدغه‌ای برای بسیاری از سیستم‌ها و صنایع تبدیل شده‌است. دنیای دیجیتالیِ امروز بر پایه‌ی اعتماد به نهادهای متعددی استوار است. برای مثال ما به مجموعه‌ای که خدمات پست الکترونیکی را ارائه می‌دهد در خصوص رسیدن پیام‌های خود به مقصد اعتماد می‌کنیم. همین‌طور با اعتماد به اینکه اطلاعات ما در یک رسانه‌ی اجتماعی مانند فیس بوک[1] تنها توسط افرادی که ما مشخص می‌کنیم قابل رؤیت است، اطلاعات شخصی خود را به اشتراک می‌گذاریم. همین امر در مورد بانکی که از طریق آن با شخص یا اشخاصی در نقاط دیگر از جهان تراکنش مالی انجام می‌دهیم نیز صدق می‌کند. بنابراین می‌توان گفت ما در مورد امنیت و حفظ حریم خصوصی خود همواره به شخص یا نهاد سومی اعتماد می‌کنیم. لیکن، این شخص سوم، که در مثال‌های بالا سرویس پست الکترونیکی، رسانه‌ی اجتماعی و بانک هستند، خود در معرض هک شدن، دستکاری و لطمه قرار دارند. زنجیره‌ی بلوکی[2] از طریق سازوکار قابل اطمینانی که ارائه می‌کند نیاز به اعتماد به شخص سوم را از میان برمی‌دارد و این امکان را فراهم می‌آورد تا اشخاص یا نهادها بدون شناخت و اعتماد به یکدیگر بتوانند در یک بستر امن به تراکنش و تعامل بپردازند. بدیهی است که بکارگیری این فناوری نه تنها انجام امور را سرعت می‌بخشد بلکه به علت حذف شخص سوم هزینه‌ی انجام کارها را نیز کاهش می‌دهد [۱].

زنجیره‌ی بلوکی فناوری نوینی است که با داشتن ویژگی‌هایی مانند عدم تمرکز، شفافیت، تغییرناپذیری و قابلیت حسابرسی توانسته به بسیاری از سیستم‌ها راه یابد و فضای امن مورد نیاز آنها را محقق سازد. زنجیره‌ی بلوکی در واقع یک پایگاه داده‌ی غیرمتمرکز از رویدادها یا تراکنش‌ها می‌باشد که میان تمام شرکت‌کنندگان در این رویدادها یا تراکنش‌ها به اشتراک گذاشته می‌شود. هر رویداد یا تراکنش در این پایگاه داده‌ی عمومی، در صورت اتفاق نظر اکثریت شرکت‌کنندگان تأیید می‌شود و پس از ثبت، قابلیت تغییر یا حذف را ندارد. بنابراین زنجیره‌ی بلوکی یک پیشینه‌ی مشخص و قابل بازبینی از تمام رویدادها و تراکنش‌هایی که تا به حال انجام گرفته فراهم می‌کند [۲]. ارز رمزنگاری شده‌ی بیت کوین[3] مشهورترین نمونه از کاربردهای فناوری زنجیره‌ی بلوکی است. به طوریکه می‌توان گفت ماهیت بیت کوین با این فناوری عجین شده‌است. به علت کارکرد موفقیت‌آمیز زنجیره‌ی بلوکی، کاربرد این فناوری فراتر از موسسات مالی و دنیای بانکداری رفته و توانسته پا به عرصه خدمات پزشکی و بهداشتی، رأی‌گیری، ثبت اسناد، نظارت بر زنجیره‌ی تأمین مواد غذایی و نیز بسیاری از صنایع زیرساختی از جمله صنعت برق بگذارد [۳]-[۸].

نفوذ گسترده‌ی منابع انرژی توزیع شده[4] در شبکه‌های توزیع برق، روش‌های سنتی تولید، انتقال و نیز توزیع برق را متحول ساخته‌است؛ به طوریکه در شبکه‌های توزیع با منابع انرژی توزیع شده‌ی متعدد، شارش توان به صورت چند سویه می‌باشد که حاکی از همکاری میان این منابع، شبکه قدرت و نیز مشتریان است. بکارگیری بیشتر منابع انرژی توزیع شده، سیستم‌های قدرت سنتی را به سوی عدم تمرکز سوق می‌دهد به طوریکه در آینده‌ی نزدیک تعداد زیادی ریزشبکه‌ی[5] توزیع شده و به هم پیوسته‌ی قابل کنترل خواهیم داشت که سیاست‌ها و مدل‌های بهره‌برداری موجود را به چالش خواهند کشید. در این میان سیستم‌های توزیع خود به بستری برای نوآوری‌های اجتماعی و فنی تبدیل شده‌اند که بازدهی، قابلیت اطمینان، تاب‌آوری و نیز پایداری سیستم قدرت را بهبود می‌بخشند. در حال حاضر، شماری از فناوری‌های اطلاعاتی به روز در این عرصه به کار گرفته می‌شوند تا بتوانند چالش‌های فنی نفوذ منابع انرژی توزیع شده به سیستم‌های قدرت سنتی را برطرف سازند. در میان چنین فناوری‌هایی، اینترنت اشیاء[6] نقش کلیدی را در ایجاد انسجام میان نظارت بر سیستم‌های قدرت و فرآیندهای فیزیکی مربوطه ایفا می‌کند. از سوی دیگر بکارگیری اینترنت اشیاء در سیستم‌های توزیع، امکان هجوم حملات سایبری را به نحو چشم‌گیری افزایش می‌دهد که می‌تواند امنیت سیستم را به خطر انداخته و حتی منجر به خاموشی‌های سراسری شود. بنا بر آنچه گفته شد، استفاده از زنجیره‌ی بلوکی در طراحی چارچوب‌های نظارتی و نیز مدیریت انرژی در شبکه‌های مجهز به منابع انرژی توزیع شده متعدد مورد توجه بسیاری از محققین حوزه انرژی و نیز امنیت سایبری قرار گرفته است [۹]-[۱۱].

در این مقاله، نخست به معرفی اجمالی ساختار زنجیره‌ی بلوکی می‌پردازیم. پس از مروری بر تحولات اخیر صورت گرفته در شبکه‌های توزیع، نیاز این سیستم‌ها به زنجیره‌ی بلوکی را می‌سنجیم. در انتها، طرح‌های پیشنهادی برای بکارگیری زنجیره‌ی بلوکی در شبکه‌های توزیع امروزی و یک نمونه‌ی کاربردی از آن را عنوان می‌کنیم.

۲- زنجیره‌ی بلوکی

ریشه‌ی فناوری زنجیره‌ی بلوکی را می‌توان به تلاش برای برچسب‌گذاری زمانی[7] اسناد و مدارک برای تعیین زمان دقیقی که اسناد تولید یا برای آخرین بار تغییر پیدا کرده‌اند در سال ۱۹۹۱ نسبت داد [۱۲]. در سال ۱۹۹۲ پایه‌گذاران این روش تغییراتی مانند بکارگیری توابع رمزنگاری هش[8] به آن اعمال کردند [۱۳]. اواخر سال ۲۰۰۸ شخص یا اشخاصی با نام مستعار ساتوشی ناکاموتو[9] اقدام به

چاپ مقاله‌ای کردند که در آن ارز دیجیتالی بیت کوین به دنیا معرفی شد. پس از ایجاد بیت کوین زنجیره‌ی بلوکی از سال ۲۰۰۹ به طور گسترده به عنوان بستر زیرساختی برای تراکنش این ارز دیجیتالی و سپس در زمینه‌های دیگر مورد استفاده قرار گرفت [۱۴]-[۱۶].

۲-۱- معماری زنجیره‌ی بلوکی

برای تشریح معماری زنجیره‌ی بلوکی از مثال انجام تراکنش توسط اعضای یک زنجیره‌ی بلوکی استفاده می‌کنیم. انجام تراکنش به معنی افزایش بلوک به زنجیره می‌باشد. در واقع بلوک‌ها برای نگهداری و ثبت تراکنش‌ها میان افراد زنجیره توزیع می‌شوند. بدین صورت تمام افراد از تراکنش در حال انجام اطلاع پیدا می‌کنند. همه‌ی اعضا یک نسخه از زنجیره‌ی بلوکی کامل را در اختیار دارند که از آن در فرآیند بازبینی کمک می‌گیرند. در فرآیند بازبینی، اعضا اطمینان حاصل می‌کنند که دستکاری یا فریبی در انجام تراکنش جدید صورت نگرفته باشد. اگر بازبینی با موفقیت انجام پذیرد، تمام اعضا بلوک جدید را به نسخه‌ی خود از زنجیره‌ی بلوکی اضافه می‌کنند. اضافه شدن یک بلوک با به اجماع رسیدن اعضای زنجیره بر سر اینکه تراکنش جدید معتبر است یا نه اتفاق می‌افتد. این اعتبارسنجی از طریق الگوریتمی مشخص صورت می‌پذیرد تا از معتبر بودن تراکنش و نیز اصالت‌سنجی شخصی که آن را انجام می‌دهد اطمینان حاصل شود. اگر شخص یا گره‌ای بتواند با موفقیت فرآیند اعتبارسنجی را انجام دهد، تشویق خواهد شد. به فرآیند اعتبارسنجی در انجام تراکنش‌های بیت کوین، استخراج[۱۰] و به چنین شخصی استخراج‌کننده[۱۱] گفته می‌شود که با دریافت بیت کوین تشویق می‌شود. زمانیکه فرآیند اعتبارسنجی تکمیل گردد، تراکنش انجام شده و بلوک جدید به زنجیره اضافه می‌شود [۱۷]-[۱۹].

۲-۲- بلوک

همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد، زنجیره‌ی بلوکی از به هم پیوستن تعدادی بلوک در یک شبکه‌ی نظیر به نظیر ایجاد می‌شود که به همین دلیل امکان بکارگیری این فناوری را در کاربری‌های توزیع‌شده[۱۲] فراهم می‌کند. هر بلوک از دو قسمت هدر[۱۳] یا سربرگ و بدنه تشکیل شده‌است. در قسمت هدر اطلاعاتی در مورد خود بلوک نظیر نوع بلوک، هش ریشه درخت مرکل[۱۴]، هش هدر بلوک قبلی، برچسب زمانی، عدد نانس[۱۵] و nBits می‌باشد. بدنه‌ی بلوک نیز شامل شمارنده‌ی تراکنش‌ها و خود تراکنش‌ها می‌باشد. حداکثر تعداد تراکنش‌هایی که یک بلوک می‌تواند در خود جای دهد وابسته به اندازه‌ی بلوک و اندازه‌ی هر تراکنش است. اطلاعات هر بلوک با توجه به نوع زنجیره‌ی بلوکی می‌تواند متفاوت باشد. برای مثال در مورد بیت کوین، اطلاعات مربوط به تراکنش بیت کوین در بلوک ذخیره می‌گردد. هشی که در بلوک‌ها استفاده می‌شود حاصل یک الگوریتم رمزنگاری نظیر SHA-256 است [۲۰] و [۲۱].

۲-۳- الگوریتم اجماع[۱۶]

به اجماع رسیدن گره‌های غیرقابل اعتماد در یک زنجیره‌ی بلوکی تعبیری از مسأله‌ی کلاسیک ژنرال‌های بیزانسی[۱۷] است. در این مسأله گروهی از ژنرال‌های ارتش که هرکدام بخشی از آن را فرماندهی می‌کنند شهر را به محاصره خود در می‌آورند. برخی ژنرال‌ها باور دارند که باید به شهر حمله شود درحالیکه باقی فرماندهان عقب‌نشینی را ترجیح می‌دهند. این در حالیست که اگر تنها تعدادی از ژنرال‌ها، و نه همگی، به شهر حمله کنند، حمله قطعاً ناموفق خواهد بود. بنابراین ژنرال‌ها باید بر سر حمله یا عقب‌نشینی به اجماع برسند. به توافق رسیدن در فضای توزیع شده، همانند آنچه بر یک زنجیره‌ی بلوکی حاکم است، بسیار دشوار می‌باشد. از آنجاییکه یک نهاد مرکزی بر نسخه‌های افراد از زنجیره‌ی بلوکی نظارت ندارد، باید پروتکل‌هایی برای ارزیابی انسجام این نسخه‌ها وجود داشته باشد [۲۲]. در ادامه به بررسی دو الگوریتم اجماع رایج در زنجیره‌های بلوکی می‌پردازیم.

- **اثبات انجام کار**[۱۸]: این استراتژی در شبکه‌های بیت کوین استفاده می‌شود. در یک شبکه‌ی غیرمتمرکز، یک فرد یا گره باید برای ثبت تراکنش‌ها انتخاب شود. ساده‌ترین راهی که به ذهن می‌رسد انتخاب یک گره به صورت تصادفی است. اما انتخاب تصادفی در برابر حمله آسیب‌پذیر می‌باشد. بنابراین اگر گره‌ای بخواهد بلوکی از تراکنش‌ها را به ثبت برساند باید کار زیادی انجام دهد تا اثبات کند که قصد حمله به شبکه را ندارد. به طور کلی منظور از کار، محاسبات کامپیوتری می‌باشد. اگر صحت‌سنجی بلوک با موفقیت انجام شود، سایر استخراج‌کنندگان نیز این بلوک را به نسخه خود از زنجیره‌ی بلوکی می‌افزایند. نخستین استخراج‌کننده مطابق با آنچه توسط شبکه تعیین می‌شود تشویق می‌گردد [۲۳] و [۲۴].
- **اثبات سهام**[۱۹]: این نوع از اجماع، جایگزینی برای الگوریتم اثبات انجام کار است که در مصرف انرژی صرفه‌جویی می‌کند. در این روش استخراج‌کنندگان باید مالکیت مقدار ارز را ثابت کنند. این باور وجود دارد که احتمال اینکه افراد با ارزهای بیشتر به شبکه حمله کنند کمتر است. انتخاب شخصی که تراکنش‌ها را ثبت می‌نماید بر اساس مانده‌ی حساب شاید اندکی غیرعادلانه به نظر برسد. چراکه فرد یا گره با بیشترین ارز بر شبکه مسلط خواهد شد. در مقایسه با اثبات انجام کار الگوریتم اثبات سهام انرژی را صرفه‌جویی می‌کند و موثرتر است. هزینه‌ی استخراج بسیار ناچیز در این روش، ممکن است منجر به حمله شود. بسیاری از زنجیره‌های بلوکی ابتدا از اثبات انجام کار استفاده می‌کنند و به تدریج به اثبات سهام روی می‌آورند. برای مثال ارز دیجیتالی اتریوم قصد دارد تا به جای اثبات انجام کار Ethash از Casper که نوعی الگوریتم اثبات سهام است استفاده کند [۲۵]-[۲۷].

۳- زنجیره‌ی بلوکی و سیستم‌های قدرت

تقاضا برای سیستم توزیعی پایدار، قابل اطمینان، امن و پربازده منجر به شکل‌گیری شبکه‌ی توزیع فعال[۲۰] که مجموعه‌ای از ریزشبکه‌ها با نقش پویای مصرف‌کنندگان برای حل چالش‌های ناشی از حضور منابع انرژی توزیع شده می‌باشد، منجر شده‌است [۲۸]-[۳۰]. فناوری‌های اطلاعاتی متعددی نظیر اینترنت اشیاء برای تحقق سیستم توزیع فعال به کار گرفته شده‌اند تا اهداف متصور برای شبکه‌ی هوشمند نظیر شکوفایی اقتصادی، حفاظت از محیط زیست و رفاه عمومی برآورده گردند [۳۱] -[۳۳]. حضور فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیاء در فضای سیستم‌های توزیع و همچنین تغییر روش‌های مدیریت انرژی از متمرکز به غیرمتمرکز، این سیستم‌ها را با چالش‌های جدیدی در خصوص امنیت اطلاعات به منظور پیاده‌سازی مدیریت غیرمتمرکز انرژی روبه‌رو ساخته‌است [۳۴]-[۳۶]. زنجیره‌ی بلوکی یک گزینه‌ی مناسب برای برطرف کردن چالش‌های جدید سیستم‌های توزیع می‌باشد که با مقتضیات آن سازگاری کامل دارد. در این بخش نخست به نقش اینترنت اشیاء در سیستم‌های توزیع و تأثیر آن می‌پردازیم. سپس کاربردهای زنجیره‌ی بلوکی در زمینه‌های متفاوت حوزه انرژی را معرفی و بررسی می‌کنیم. در انتها با مروری کوتاه بر انگیزه‌های حرکت به سوی عدم تمرکز در حوزه‌ی سیستم‌های توزیع به ویژه از منظر امنیت سایبری، جایگاه زنجیره‌ی بلوکی را به عنوان بستری امن برای پیاده‌سازی مدیریت غیرمتمرکز شبکه‌های توزیع فعال که مهم‌ترین کاربرد این فناوری در سیستم‌های قدرت به شمار می‌آید، مطرح می‌کنیم.

۳-۱- اینترنت اشیاء در سیستم‌های توزیع فعال

اینترنت اشیاء با فراهم کردن حسگرها و عملگرهای پیشرفته و نیز تجهیزات مخابراتی کم هزینه، سعی در هوشمندسازی سیستم توزیع دارد. بنابراین، اجزای سیستم توزیع می‌توانند تغییرات پیوسته در فضای بهره‌برداری را حس کرده و بر اساس تحلیل داده‌ها به طور خودمختار به تصمیم‌گیری و اقدام بپردازند. بکارگیری منسجم اینترنت اشیاء در سیستم‌های توزیع فعال، فرصت‌های بیشماری برای تصمیم‌گیری در بخش‌های مختلف حوزه‌ی مدیریت انرژی نظیر بهره‌برداری، نگهداری و برنامه‌ریزی پدید می‌آورد که می‌تواند به طور موثر پتانسیل‌های منابع انرژی توزیع شده را بهره‌برداری کند [۳۷]. شرکت‌ها و ارائه دهندگان خدمات برقی از اینترنت اشیاء برای ایجاد یک تصویر جامع از شرایط تولید و مصرف در شبکه‌های توزیع استفاده می‌کنند تا بتوانند دامنه‌ی گسترده‌ای از خدمات را به مشتریان ارائه دهند. در همین حال، مشتریان نیز از اینترنت اشیاء برای بهره بردن از مزایای مشارکت پویا در سیستم‌های توزیع فعال از طریق برنامه‌های پاسخگویی تقاضا استفاده می‌کنند. از این رو سیستم‌های توزیع فعال به عنوان یکی از نمونه‌های کاربردی و پیشرو از اینترنت اشیاء در نظر گرفته می‌شود. اینترنت اشیاء نقش حیاتی در پیاده‌سازی مخابره ماشین-ماشین و نیز تعاملات ماشین-انسان به صورت مقیاس-بزرگ دارد. به عنوان یک نمونه‌ی کاربردی، مبدل‌های صنعتی[۲۱] که از طریق اینترنت اشیاء به هوش عملیاتی دست می‌یابند، می‌توانند به صورت خودکار گزارش ارائه دهند و نیز عملیات‌ها را کنترل کنند. نتیجه‌ی چنین هوشمندسازی تنظیم دقیق ولتاژ پایانه و نیز توان خروجی منبع انرژی توزیع شده‌ی متصل به مبدل است [۳۸].

اینترنت اشیاء می‌تواند تأثیر چشم‌گیری بر رؤیت‌پذیری و کنترل‌پذیری عملیات مختلف بهره‌برداری در شبکه‌های توزیع فعال داشته باشد. با توجه به تعداد زیاد منابع انرژی توزیع‌شده در شبکه‌های توزیع فعال که عموماً از راه دور کنترل می‌شوند، مدیریت این منابع از طریق بازدیدهای میدانی عملی نمی‌باشد. علاوه بر این، هزینه‌ی انجام این بازدیدها از جذابیت بکارگیری منابع انرژی توزیع شده برای بهره‌گیری از انرژی تجدیدپذیر می‌کاهد. اینترنت اشیاء یک راه حل برای کنترل از راه دور و زمان-واقعی، عیب‌یابی و نیز نگهداری پیش‌گویانه‌ی این منابع می‌باشد. برای مثال منابع انرژی توزیع شده‌ی مجهز به اینترنت اشیاء، می‌توانند با توجه به شرایط منبع انرژی، اخطارهایی را در خصوص نگه‌داری آن گزارش دهند تا از هزینه‌ی ارسال گروه‌های بازرسی به محل کاسته شود. در مقایسه با روش‌های سنتی کنترل اجزای شبکه، مانند تنظیم‌کننده‌های ولتاژ[۲۲] و خازن‌ها، که غالباً در نواحی دور از دسترس قرار دارند و بهره‌برداران از پیکربندی ثابتی برای آنها استفاده می‌کنند، راه‌حل‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء می‌تواند عملکرد پربازده‌تر و انعطاف‌پذیرتری را ارائه دهد. برای مثال در شبکه‌های توزیع فعال که عموماً به صورت مش[۲۳] و با افزونگی خطوط طراحی شده‌اند، بهره‌برداران ممکن است جهت رفع اضافه ولتاژها[۲۴] و تراکم خطوط که به علت حضور منابع انرژی تجدیدپذیر رخ می‌دهند دست به تغییر پیکربندی شبکه بزنند [۳۹]. با وجود اینترنت اشیا، تجهیزات پیشرفته‌ی کنترلی مانند خطوط قابل تغییر[۲۵]، ترانسفورماتورهای تغییردهنده‌ی تپ زیر بار[۲۶] و جبران‌سازهای توان راکتیو استاتیکی[۲۷]، می‌توانند به صورت خودکار فرمان‌های کنترلی را برای تغییر سریعتر پیکربندی صادر کنند [۴۰]. پیاده‌سازی گسترده‌ی اینترنت اشیاء می‌تواند آگاهی موقعیتی و نیز رؤیت‌پذیری زمان-واقعی بی‌مثالی برای بهره‌برداران به ارمغان بیاورد که از طریق آن درک بهتری نسبت به جریانات چندجهتی، عملکرد زمانی و موقعیتی منابع انرژی توزیع‌شده پیدا کنند. علاوه بر آنچه گفته شد، بهره‌برداران می‌توانند برای بالا بردن کیفیت خدمات برقی به مشتریان از جمله تسریع تشخیص و بازیابی خاموشی‌ها، پاسخگویی سریعتر به درخواست‌های مشتریان و نیز تنظیم پیشرفته‌تر ولتاژ و فرکانس، در شرایطی که تولید و تقاضای انرژی الکتریکی بیش از پیش با عدم قطعیت همراه می‌باشد، استفاده کنند [۴۱]-[۴۳]. در فضای یاد شده، در صورت بروز ناهنجاری در سیستم توزیع، تجهیزات مبتنی بر اینترنت اشیاء می‌توانند با اقدامات خودکار به رفع ناهنجاری‌ها بپردازند. استفاده از تکنولوژی‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء امکانات متعددی در اختیار مصرف‌کنندگان قرار می‌دهد تا نقش خود را در بهبود بهره‌برداری از

شبکه‌ی توزیع به عنوان مشارکت سمت تقاضا ایفا کنند. با پیشرفت فناوری اینترنت اشیاء، قیمت تجهیزات مبتنی بر این تکنولوژی برای عموم مشتریان مقرون به صرفه خواهد شد که امکان نظارت و کنترل بر پروفایل‌های تولید محلی و نیز مصرف را برای آنها فراهم می‌آورد. تکنولوژی‌هایی با رویکرد خانه‌ی هوشمند، می‌توانند تأثیر چشم‌گیری در افزایش توانایی و نیز تمایل مشتریان برای بهینه‌سازی مصرف خود در پاسخ به سیگنال‌های قیمت زمانِ استفاده[۲۸] داشته باشند. این امکان می‌تواند از طریق بسترهای کنترلی مانند گوشی همراه هوشمند، تبلت[۲۹]و کامپیوترهای شخصی برای مشتریان فراهم شود. پیوستگی میان اشیاء هوشمند از طریق مخابرات پرسرعت و خدمات ابری[۳۰] قوی، مشتریان را قادر می‌سازد تا بتوانند تنظیمات وسایل خود را به وسیله‌ی شبکه‌های بی‌سیم تغییر دهند.

۳-۲- کاربردهای زنجیره‌ی بلوکی در سیستم‌های قدرت

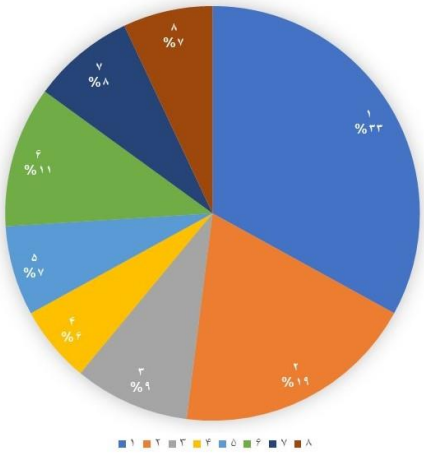
پس از ابداع و راهیابی تکنولوژی زنجیره‌ی بلوکی به عرصه‌های گوناگون، این فناوری به عنوان گزینه‌ای همسو با تغییرات ایجاد شده توسط اینترنت اشیاء در حوزه‌ی انرژی مطرح شد که به عنوان زیرساخت مکمل اینترنت اشیاء، توانایی بهبود رویه‌ها و کاربری‌های کنونی سیستم‌های قدرت را از طریق اصلاح پردازش‌های داخلی، بهبود سرویس‌های ارائه شده به مشتریان و نیز کاهش هزینه‌ها دارد.

زنجیره‌ی بلوکی می‌تواند به دامنه‌ی گسترده‌ای از خدمات و عملیات‌ها در حوزه‌ی بهره‌برداری و مبادلات انرژی در سیستم‌های قدرت امروزی اعمال شود. در ادامه، به معرفی برخی از این تغییرات و نقش‌های آتی زنجیره‌ی بلوکی می‌پردازیم.

- صدور صورت حساب: زنجیره‌ی بلوکی در کنار سیستم‌های اندازه‌گیری هوشمند می‌تواند احتساب و نیز صدور صورت‌حساب‌های خودکار را میسر سازد. در این صورت شرکت‌های برقی می‌توانند از پتانسیل‌هایی نظیر مکانیزم ریزپرداخت[۳۱] بهره‌مند گردند.
- فروش و بازاریابی: ارائه‌ی سیگنال‌های قیمت برق ممکن است در اثر عواملی نظیر پروفایل مصرف مشتریان، ترجیحات آنها و نیز ملاحظات محیط زیستی تغییر کنند. فناوری زنجیره‌ی بلوکی در کنار روش‌های هوش مصنوعی، به ویژه یادگیری ماشین[۳۲]، می‌تواند الگوهای مصرف مشتریان را شناسایی و بر اساس آنها خدمات با ارزش افزوده را به مشتریان مطابق با نیازهایشان عرضه کند.
- اتوماسیون: بازارهای برق محلی و نیز مبادله‌ی نظیر به نظیر انرژی در سیستم‌های توزیع به نحو چشمگیری تولید و مصرف مستقل مشتریان، که به فعالیت‌های پشت کنتور[۳۳] معروف هستند، را افزایش می‌دهد که تاثیر به سزایی بر تعرفه‌های برق و نیز درآمد حاصل از فروش برق دارد. در این میان، زنجیره‌ی بلوکی می‌تواند کنترل سیستم‌های توزیع شده و نیز ریزشبکه‌ها را بهبود بخشد.
- انتقال داده: زنجیره‌ی بلوکی می‌تواند بستر مناسبی برای ارتباط میان تجهیزات هوشمند، انتقال یا ذخیره‌ی داده باشد. تجهیزات هوشمند به ویژه در زمینه‌ی شبکه‌های هوشمند شامل تجهیزات اندازه‌گیری، حسگرهای پیشرفته، تجهیزات پایش شبکه، سیستم‌های کنترل و مدیریت انرژی و هم‌چنین سیستم‌های مدیریت و پایش در سطح خانه‌ها و ساختمان‌های هوشمند می‌باشد. علاوه بر میسر ساختن انتقال امن داده، شبکه‌های هوشمند می‌توانند از استانداردسازی داده در زنجیره‌ی بلوکی نیز بهره ببرند.
- مدیریت شبکه: فناوری زنجیره‌ی بلوکی می‌تواند مدیریت شبکه، ارائه‌ی سرویس‌های قابلیت انعطاف[۳۴] و نیز مدیریت دارایی شبکه‌های توزیع شده را تسهیل کند. علاوه بر این، زنجیره‌ی بلوکی می‌تواند بستری برای بهینه‌سازی منابع انعطاف‌پذیر ایجاد کند که در غیر این صورت می‌تواند منجر به هزینه‌های گزاف برای ارتقای شبکه گردد.
- امنیت و مدیریت هویت: روش‌های رمزنگاری می‌تواند به حفظ امنیت در تراکنش‌های انرژی، حریم شخصی، محرمانه ماندن اطلاعات و نیز مدیریت هویت نهادهای مبادله‌گر انرژی کمک کند.
- به اشتراک گذاشتن منابع: زنجیره‌ی بلوکی می‌تواند در محاسبه‌ی هزینه‌ی قابل پرداخت برای استفاده از منابع به اشتراک گذاشته شده، نظیر زیرساخت‌های شارژ خودروهای الکتریکی، پایگاه‌های داده یا منابع مرکزی ذخیره‌ی داده به کار رود.
- بازارهای برق و مبادله‌ی انرژی: استفاده‌ی گسترده از بسترهای توزیع‌شده‌ی مبادله‌ی انرژی مبتنی بر زنجیره‌ی بلوکی می‌تواند به تغییرات اساسی در بازارهای عمده‌ی برق، تراکنش‌های مبادله‌ی تجهیزات شبکه و نیز مدیریت ریسک در این زمینه بینجامد. در این میان، ویژگی‌های منحصر به فرد این فناوری می‌تواند تسریع انجام تراکنش‌ها و تسهیل یافتن تأمین‌کننده‌ی انرژی را به ارمغان بیاورد که خود منجر به پویایی بیشتر در بازارهای انرژی و در نتیجه کاهش تعرفه‌ها می‌گردد. علاوه بر این، شفافیت در ارائه‌ی سوابق غیرقابل تغییر نیز می‌تواند در حسابرسی موثر تراکنش‌ها مسمر ثمر واقع شود.

در ادامه، به ارزیابی آماری طرح‌های مبتنی بر زنجیره‌ی بلوکی در صنعت، پروژه‌های آزمایشی و نیز مدل‌های کسب و کار در حوزه‌ی انرژی می‌پردازیم. در یک مطالعه‌ی گسترده که به بررسی ۱۴۰ پروژه‌ی نوآورانه‌ی زنجیره‌ی بلوکی در حوزه‌ی صنعت برق در سراسر دنیا می‌پردازد، بکارگیری این فناوری در هشت زمینه‌ی کلی مورد بررسی

قرار می‌گیرد. شکل (۱) توزیع آماری پروژه‌های صنعتی زنجیره‌ی بلوکی مورد بررسی را در این هشت زمینه نشان می‌دهد [۴۴].



شکل (۱): توزیع آماری پروژه‌های مبتنی بر زنجیره‌ی بلوکی در حوزه‌ی انرژی

هرکدام از بخش‌های نمودار نمایش داده شده در شکل (۱) معرف یکی از زمینه‌های استفاده از این فناوری می‌باشند که در ادامه به ترتیب بیشترین موارد استفاده عنوان شده‌اند.

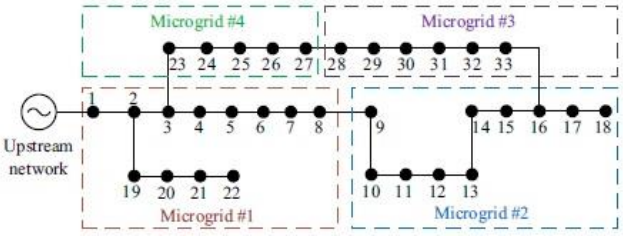
۱. مبادله‌ی انرژی به صورت توزیع‌شده
۲. رمزارزها و سرمایه‌گذاری
۳. اینترنت اشیاء، تجهیزات هوشمند، اتوماسیون و مدیریت دارایی‌ها
۴. اندازه‌گیری و صدور صورت حساب
۵. مدیریت شبکه
۶. خودروهای برقی
۷. مبادله‌ی کربن و گواهینامه‌های سبز
۸. کاربردهای کلی و کنسرسیوم

همان‌طور که از شکل (۱) بر می‌آید، بیشترین کاربرد زنجیره‌ی بلوکی تا کنون در زمینه‌ی مبادله‌ی توزیع‌شده‌ی انرژی شامل مبادلات نظیر به نظیر مشتریان در سیستم‌های قدرت می‌باشد. اگرچه از ویژگی‌های بی‌بدیل این فناوری در سایر زمینه‌ها نیز بهره گرفته شده‌است، بدیهی است که به علت ریشه‌ی فناوری زنجیره‌ی بلوکی در انجام تراکنش‌های مالی، از این روش به نحو قابل توجهی جهت تسهیل مبادلات انرژی در فضایی که در حال گذار به عدم تمرکز است، استفاده شود. در ادامه‌ی این مقاله به انگیزه‌های حرکت به سوی مدیریت غیرمتمرکز در سیستم‌های قدرت، به ویژه سیستم‌های توزیع می‌پردازیم و سپس قراردادهای هوشمند را به عنوان یکی از دستاوردهای زنجیره‌ی بلوکی و روشی مناسب و قابل اعمال به این فضا معرفی می‌کنیم.

۳-۳- گذار از مدیریت انرژی متمرکز به غیرمتمرکز

با نفوذ هرچه بیشتر منابع انرژی توزیع‌شده به سیستم‌های توزیع فعال، این سیستم‌ها به سوی عدم تمرکز پیش می‌روند و به جایگزینی برای روش‌های بهره‌برداری سنتی متمرکز بدل می‌شوند که نقاط ضعف و ناکارآمدی‌های برخاسته از انتقال توان تولیدی از مسافت‌های طولانی به مراکز مصرف را برطرف می‌سازند. ریزشبکه را می‌توان نمونه‌ای از یک سیستم قدرت توزیع‌شده دانست که پربازده، قابل اطمینان و تاب‌آور است. ریزشبکه‌ها می‌توانند با بهره‌گیری از منابع انرژی قابل کنترل محلی، به خدمات برقی بازدهی و تداوم بخشند [۴۵]. ریزشبکه‌ها نخست به برطرف کردن تقاضای محلی و سپس به برق‌رسانی و ارائه‌ی خدمات جانبی به سایر بخش‌های شبکه‌ی توزیع فعال می‌پردازند. برای مثال، ریزشبکه‌ها می‌توانند از طریق تولید یا جذب محلی توان راکتیو[۳۵]، ولتاژ را در بازه‌ی مجاز حفظ کنند. همچنین ریزشبکه‌ها می‌توانند به فرونشاندن آثار اختلالات عمده، ناشی از وقایعی مانند بلایای طبیعی و نیز حملات سایبری گسترده کمک کنند [۴۶] و [۴۷]. در صورت بروز اختلالات شدید، ریزشبکه‌ها می‌توانند به حالت جزیره درآمده و به عنوان یک نهاد خودکفا به کار خود ادامه دهند. با بهره‌گیری از منابع انرژی موجود در محل، ریزشبکه‌های جزیره شده خدمات محلی و کلیدی را در سطح قابل قبولی حفظ می‌کنند و با فراهم کردن بخشی از تقاضای شبکه‌ی توزیع فعال، بازیابی آن را تسریع می‌نمایند [۴۸]. همبندی ریزشبکه‌هایی که از نظر جغرافیایی به یکدیگر نزدیک هستند می‌تواند پایداری، بازدهی، تاب‌آوری و امنیت شبکه‌ی توزیع فعال را ارتقا دهد [۴۹]. ریزشبکه‌های به هم پیوسته[۳۶] می‌توانند با به اشتراک گذاشتن منابع انرژی موجود در ریزشبکه‌های مجزا، ظرفیت نصب کل مورد نیاز را کاهش دهند. علاوه بر این، ریزشبکه‌های به هم پیوسته سطح بالاتری از قابلیت اطمینان را فراهم می‌کنند چراکه هر ریزشبکه می‌تواند با در اختیار گذاشتن مقداری تولید پشتیبان، مانع از قطعی برق در سایر ریزشبکه‌ها شود [۵۰]. شکل (۲) تقسیم‌بندی سیستم توزیع ۳۳-باس را به مجموعه‌ای از ۴ ریزشبکه‌ی به هم پیوسته نشان می‌دهد. در مجموع می‌توان گفت که ریزشبکه‌های به هم پیوسته تاب‌آوری بیشتری در برابر اختلالات برخاسته از وقایع بحرانی دارند چراکه احتمال وقوع قطعی هم‌زمان آنها در چندین ریزشبکه ناچیز است.

بنابراین با تقسیم یک شبکه‌ی توزیع فعال به تعدادی ریزشبکه‌ی به هم پیوسته، ریزشبکه‌ها می‌توانند به صورت مجزا یا هماهنگ با یکدیگر عمل کنند و تقاضای خود را از طریق منابع انرژی خود یا خرید انرژی از همتایان تغذیه کنند. همکاری میان ریزشبکه‌ها برای بهبود امنیت و بازدهی شبکه‌ی توزیع فعال، مدیریت آن را به صورت غیرمتمرکز در می‌آورد. در ادامه، نخست به بررسی چالش‌های مدیریت متمرکز انرژی از منظر فناوری‌های اطلاعاتی و نیز امنیت داده می‌پردازیم و سپس بهبود آن را با مدیریت غیرمتمرکز ارزیابی می‌کنیم.



شکل (۲) : ریزشبکه‌های به هم پیوسته در سیستم توزیع ۳۳-باس

۳-۴- چالش‌های مدیریت متمرکز شبکه‌ی توزیع فعال

برای بررسی نحوه‌ی مدیریت، یک نهاد به عنوان بهره‌بردار سیستم توزیع[۳۷] یا DSO در نظر می‌گیریم که ریزشبکه‌های به هم پیوسته را به سیستم قدرت مرتبط می‌سازد و با بهره‌بردار مستقل شبکه[۳۸] یا ISO به تبادل اطلاعات بازار عمده‌ی برق و میزان مصرف کلی شبکه‌ی توزیع فعال می‌پردازد. هر ریزشبکه نیز به یک کنترل‌کننده‌ی مرکزی[۳۹] یا MGMC برای مخابره و کنترل منابع انرژی محلی مجهز است و از طریق آن با DSO صحبت می‌کند. بنابراین میان ISO، DSO و MGMCها تبادل دو سویه‌ی اطلاعات وجود دارد. در این میان پیاده‌سازی اینترنت اشیاء در شبکه‌های توزیع فعال خود منجر به تولید حجم انبوهی از داده می‌شود که در نهایت به هوش عملی تبدیل می‌گردد. این حجم انبوه و متنوع از داده‌ها که عموماً از MGMCها گزارش می‌شوند به نوعی پردازش ابری[۴۰] را الزامی می‌کنند [۵۱]. پردازش ابری بر پایه‌ی تعدادی سِرور[۴۱] قوی که از طریق اینترنت به یکدیگر متصل هستند عمل می‌کند که امکان بازیابی و پردازش حجم زیاد داده را برای تحلیل آنها فراهم می‌آورد. در یک طرح پیشنهادی، DSO از خدمات ابری برای تصمیم‌گیری در خصوص مدیریت انرژی متمرکز استفاده می‌کند و MGMCها نیز از طریق اینترنت با ابر ارتباط برقرار می‌کنند [۵۲]. از بسترهای ابری موجود که برای خدمات مبتنی بر اینترنت اشیاء طراحی شده‌اند، می‌توان به Amazon Web Services، Google CloudPlatform و Salesforce IoT Cloude اشاره کرد [۵۳]-[۵۵]. اگرچه طرح‌های مبتنی بر محاسبات ابری برای مدیریت انرژی متمرکز به دلایلی از جمله تأخیر در انتقال داده به علت محدودیت پهنای باند، اختلال در کل فرآیند تصمیم‌گیری به علت خرابی یک سِرور و مقیاس‌پذیری فیزیکی ضعیف که خود به علت بالا بودن هزینه‌ی بهبود عملکرد سِرورهای ابری پیش می‌آید، ممکن است موفق نباشند [۵۶]-[۵۸]. برای مثال پایگاه داده‌ی ابری مرکزی به طور خاص به حملات سایبری حساس است که می‌تواند داده‌های ذخیره شده را دستکاری و در نتیجه امنیت شبکه‌ی توزیع فعال را به خطر بیندازد. به علاوه، ارتباطات گسترده میان DSO و MGMCها خود در معرض حملات سایبری از جمله حملات مردی در میان[۴۲] و نیز عدم پذیرش سرویس[۴۳] هستند. نشت اطلاعات خصوصی مشتریان از دیگر نگرانی‌های امنیت سایبری در خصوص مدیریت انرژی متمرکز می‌باشد [۵۹]. چراکه تصمیم‌گیری در این نوع از مدیریت به حل یک مسأله‌ی بهینه‌سازی بزرگ و پیچیده منجر می‌شود که تعداد زیادی از تصمیم‌گیران مستقل، MGMCها که کنترل هر ریزشبکه را بر عهده دارند، را شامل می‌شود. بنابراین MGMCها باید خروجی حسگرهای خود را که اطلاعات خصوصی نظارتی محسوب می‌شوند در اختیار DSO قرار دهند. همچنین توانایی تصمیم‌گیری برای هر ریزشبکه هم باید به DSO اعطا شود تا این نهاد بالادست بتواند به رؤیت‌پذیری سراسری و نیز کنترل‌پذیری کامل بر تجهیزات شبکه توزیع فعال دست یابد. این در صورتی است که MGMCها تمایلی به فاش کردن اطلاعات حساس مشتریان شامل نوع بار مصرفی و نیز میزان تولید منبع انرژی محلی ندارند. بنابراین طرح مدیریت انرژی متمرکز DSO نمی‌تواند به یک راه حل بهینه‌ی سراسری بینجامد.

۳-۵- مدیریت غیرمتمرکز شبکه‌ی توزیع فعال و مزایای آن

فناوری‌های بهره‌برداری نظیر بهینه‌سازی غیرمتمرکز توسط ریزشبکه‌های به هم پیوسته از یک سو و فناوری‌های اطلاعاتی مانند پردازش مرزی[۴۴] و زنجیره‌ی بلوکی از سوی دیگر، راه‌حل‌های تأثیرگذاری برای بهبود مدیریت انرژی در شبکه‌های توزیع فعال با نفوذ اینترنت اشیاء ارائه می‌کنند. ایجاد هماهنگی میان این دو دسته فناوری می‌تواند منجر به ایجاد یک چارچوب سلسله مراتبی مدیریت انرژی شود که تصمیم‌گیری‌های در این حوزه را ضمن حفظ امنیت سایبری، به صورت غیرمتمرکز درآورد [۶۰]. در واقع این طرح می‌تواند تعادل میان بازدهی عملکرد شبکه‌ی توزیع فعال و حفظ حریم خصوصی و تصمیم‌گیری مستقل ریزشبکه‌ها را برقرار سازد. در این طرح MCMGها نقش کلیدی در مدیریت انرژی غیرمتمرکز ایفا می‌کنند و از این رو باید توانایی بالا در پردازش اطلاعات به منظور پردازش مرزی، ظرفیت کافی برای ذخیره‌ی اطلاعات برای پیاده‌سازی فناوری زنجیره‌ی بلوکی و نیز انعطاف‌پذیری در برنامه‌پذیری داشته باشند. برخلاف مدل از–بالا-به-پایین که بر یک هماهنگ‌کننده‌ی مرکزی مانند DSO تکیه دارد، MCMGها یک شبکه‌ی مش برای تبادل اطلاعات ایجاد می‌کنند که در آن با تعامل مستقیم و نظیر به نظیر با یکدیگر، مشکلات امنیت سایبری موجود در مدیریت متمرکز همانند نشت اطلاعات حساس و نیز تأخیر مخابراتی را از میان بر می‌دارند. MCMGها جریان‌های داده‌ی دریافتی از تجهیزات محلی مبتنی بر اینترنت اشیاء را جمع‌آوری، ادغام، تحلیل و ذخیره می‌کنند. قابلیت بالای این نهادها در پردازش‌های مرزی، امکان انجام تصمیم‌گیری‌های غیرمتمرکز و مبتنی بر داده را به آنها می‌دهد. به اشتراک گذاشتن اطلاعات غیرحساس نظیر ظرفیت تولید موجود یا هزینه‌ی حاشیه‌ای تولید، به MGMCها امکان هماهنگ‌سازی تصمیمات مرتبط با مدیریت انرژی را برای رسیدن به یک هدف مشترک می‌دهد. این هدف می‌تواند کمینه کردن هزینه‌ها برای ایجاد

تعادل توان در سطح شبکه‌ی توزیع فعال یا بازیابی هرچه سریع‌تر خدمات برق‌رسانی باشد [۶۱] و [۶۲].

۳-۶- نقش زنجیره‌ی بلوکی در مدیریت انرژی غیرمتمرکز

در این میان زنجیره‌ی بلوکی، یک روش قدرتمند و منحصر به فرد برای ذخیره‌سازی مطمئن اطلاعات به صورت غیرمتمرکز ارائه می‌دهد که چالش‌هایی نظیر حفظ حریم خصوصی و قابلیت اطمینان که در حضور اینترنت اشیاء ایجاد شده‌اند را مرتفع می‌سازد [۶۳]. تعاملات MGMCها در راستای تصمیمات مدیریت انرژی به طور خودکار و غیرقابل تغییر توسط زنجیره‌ی بلوکی ذخیره می‌گردد که در مقایسه با خدمات ذخیره‌ی اطلاعات به صورت ابری، صرفه‌ی اقتصادی بیشتری دارد [۶۴]. در واقع زنجیره‌ی بلوکی به عنوان یک پایگاه داده‌ی غیرمتمرکز، سوابق تبادل اطلاعات در زمینه‌ی عملکرد شبکه‌ی توزیع فعال را به طور خودکار میان شبکه‌ای از MGMCها به اشتراک می‌گذارد به نحوی که این داده‌ها به صورت موازی و هم‌زمان در سراسر شبکه به روز رسانی می‌شوند. هر MGMC با در دست داشتن نسخه‌ی جدید این سوابق قادر است تا اطلاعات را بدون نیاز به یک نهاد سوم مورد اعتماد، مانند DSO، به روز رسانی و تأیید کند. با افزایش ابعاد زنجیره‌ی بلوکی در گذر زمان، تنها MGMCها اجازه‌ی دسترسی به زنجیره‌ی بلوکی را خواهند داشت و تجهیزات مبتنی بر اینترنت اشیاء به علت محدودیت در پردازش و ظرفیت ذخیره، به طور مستقیم با زنجیره‌ی بلوکی ادغام نمی‌شوند. اگر تبادل داده میان MGMCها در مقیاس‌های زمانی مختلف روی دهد، چندین زنجیره‌ی بلوکی به جای یکی قابل استفاده خواهند بود. در هر ریزشبکه، تجهیزات اینترنت اشیاء که از نظر جغرافیایی پراکنده هستند، پیوسته با MGMC در ارتباط هستند تا داده‌های نظارتی را گزارش کرده و فرمان‌های کنترلی را بر اساس آنها از MGMC دریافت کنند. با در نظر گرفتن ملاحظات امنیت سایبری کافی، MGMCها نهاد مرکزی و مورد اعتماد برای مدیریت و ذخیره‌ی جریان‌های داده‌ی اینترنت اشیاء در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر آنچه گفته شد، استفاده‌ی گسترده از شبکه‌های نرم‌افزار-محور[۴۵] امنیت جامعی را در خصوص مخابرات داخل ریزشبکه‌ای فراهم می‌آورد [۶۵]. بنابراین مهاجمان به سختی می‌توانند مانع مخابره‌ی اطلاعات شوند یا داده‌ها را دستکاری کنند چراکه MGMC به سادگی قادر است تا حملات سایبری را شناسایی و پیامدهای ناشی از آن را به منظور حفظ کارآمدی و قدرتمندی در تصمیم‌گیری‌های مدیریت انرژی تقلیل دهد.

۳-۷- قرارداد هوشمند و انرژی تراکنشی، یک سناریو عملی

از آنجاییکه زنجیره‌ی بلوکی یک سابقه‌ی همگانی قابل ارزیابی و اعتبار سنجی از تمامی تعاملات MCMGها ارائه می‌کند، این نهادها مجبور به رفتار صادقانه می‌باشند. اما ظهور قراردادهای هوشمند[۴۶]، اجماع غیرمتمرکز و بهینه‌سازی‌های با درجه‌ی بالای استقلال میان MGMCها را بیش از پیش تسهیل می‌کند. در اصل، قراردادهای هوشمند سندهای خود اجرایی[۴۷] می‌باشند که امکان اتوماسیون غیرمتمرکز را به صورت از پیش تعیین شده‌ای فراهم می‌کنند. قراردادهای هوشمند بر پایه‌ی متنی که از پیش و به صورت شفاف و مشخص توسط هر یک از اعضا یا جمعی از آنها تعریف شده‌است اجرا می‌گردد. مشابه سایر سوابق داده، منطق قراردادهای هوشمند برای تمامی اعضا قابل بررسی می‌باشد. علاوه بر این، تمام اعضا می‌توانند به نسخه‌ی رمزنگاری شده‌ی قابل ارزیابی از اجرای قرارداد هوشمند دسترسی داشته باشند. بنابراین تمامی اعضا می‌توانند قرارداد هوشمند را منحصراً اجرا کنند و اجرای آنها به صورت تضمین شده‌ای قابل ارزیابی و اعتبارسنجی می‌باشد [۶۶]-[۶۸]. قراردادهای هوشمند را می‌توان قطعه‌ی آخر برای تکمیل پازل اتوماسیون تعاملات میان ریزشبکه‌های به هم پیوسته دانست. در عمل نیز زنجیره‌های بلوکیِ مبتنی بر قرارداد هوشمند، پتانسیل‌های تأثیرگذاری برای ایجاد امنیت در عملکرد شبکه‌ی توزیع فعال نشان داده‌اند. وجود منابع انرژی توزیع شده‌ی متعدد همراه با اینترنت اشیاء در ریزشبکه‌ها موجب شده تا آنها در برخی بازه‌های زمانی نقش تولیدکننده و در سایر بازه‌ها نقش مصرف‌کننده را داشته باشند [۶۹] و [۷۰]. این پدیده امکان تصمیم‌گیری‌های هوشمندانه در خصوص زمان و مقدار تولید، مصرف، ذخیره، خرید یا فروش انرژی را به ریزشبکه‌ها اعطا می‌کند و درها را برای انجام تراکنش‌های رقابتی و نظیر به نظیر میان ریزشبکه‌ها می‌گشاید. نقش جدید این ریزشبکه‌های تراکنشی[۴۸] در بازار، زمینه را برای یک سیستم مبادله‌ی انرژی تماماً غیرمتمرکز پایه گذاری می‌کند. بر این اساس DSO می‌تواند یک سیستم انرژی تراکنشی قابل اطمینان میان ریزشبکه‌های به هم پیوسته ایجاد کند تا تراکنش‌های نظیر به نظیر به صورت شفاف و عادلانه در شبکه‌های توزیع فعال انجام گیرند [۷۱]-[۷۳]. مدیریت انرژی تراکنشی می‌تواند ضمن حفظ امنیت سایبری، از طریق چارچوب سلسله مراتبی بخش قبل تحقق پذیرد؛ چراکه طبیعت غیرمتمرکز مدیریت انرژی تراکنشی با زنجیره‌ی بلوکی همراه با قرارداد هوشمند سازگار است. مبادله‌ی انرژی نظیر به نظیر به صورت یک مسأله‌ی بهینه‌سازی جامع فرمول‌بندی می‌شود که به صورت غیرمتمرکز و با کمک قراردادهای هوشمند موجود در زنجیره‌ی بلوکیِ تبادل انرژی حل می‌شود. برای رسیدن به اجماع در تراکنش، هر عضو شبکه، پیشنهاد تولید یا مصرف خود را ارائه می‌کند. اجماع غیرمتمرکز بر سر تراکنش‌های بهینه می‌تواند از طریق روش‌هایی مانند ADMM انجام شود . در این صورت هر ریزشبکه یک مسأله‌ی محلی که بخشی از یک مسأله‌ی بهینه‌سازی کلی است را حل می‌کند و نتیجه‌ی بهینه‌سازی آنها به قرارداد هوشمند داده می‌شود تا پاسخ‌های بهینه‌ی محلی را به بهینه‌ی سراسری نزدیک کند. برنامه‌های بهینه‌ی تبادل انرژی و قیمت‌های محلی‌ای که برای آنها ارائه می‌گردد در نهایت به بلوک‌های زنجیره اضافه می‌شوند [۷۴]-[۷۶].

۴- نتیجه‌گیری

وابستگی روز افزون افراد به اینترنت در عرصه‌های مختلف زندگی از یک سو و اهمیت یافتن امنیت اطلاعات از سوی دیگر منجر به تلاش برای ابداع تجهیزات و پیاده‌سازی فناوری‌هایی شده‌است که قادر به حفظ امنیت اطلاعات کاربران در فعالیت‌های مبتنی بر اینترنت می‌باشد. بدیهی است که سیستم‌های قدرت به ویژه سیستم‌های توزیع نیز از اینترنت به عنوان بستر مناسبی برای مخابره بهره می‌برند و به همین دلیل گسترش تجهیزات مبتنی بر اینترنت اشیاء در سیستم‌های قدرت را شاهد هستیم. ورود این پدیده به حوزه‌ی سیستم‌های توزیع چالش‌هایی را در بهره‌برداری و نیز امنیت سایبری ایجاد می‌کند. زنجیره‌ی بلوکی فناوری جدیدی در سیستم‌های غیرمتمرکز است که به علت طبیعت غیرمتمرکزش با دیگر تحولات سیستم‌های توزیع از جمله نفوذ منابع انرژی توزیع‌شده‌ی متعدد و مدیریت انرژی غیرمرکزی سازگاری کامل دارد و لذا به عنوان بستری امن برای بهره‌برداری و نیز توسعه‌ی کاربری‌هایی مانند پیاده‌سازی بازارهای انرژی نظیر به نظیر، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که تاکنون بیشترین تمرکز بر بکارگیری این فناوری در خصوص بازارهای انرژی، به ویژه بازارهای پیاده‌سازی شده در چارچوب انرژی‌های تراکنشی، بوده‌است. اگرچه بستر امن ایجاد شده در زنجیره‌ی بلوکی در سایر زمینه‌ها مانند صدور صورت حساب با جزئیات دقیق، تبادل اطلاعات در کنترل و پایش شبکه و غیره نیز کاربرد دارد. بدیهی است با نفوذ هرچه بیشتر اینترنت اشیاء به سطوح مختلف سیستم‌های قدرت در آینده نزدیک، امنیت سایبری اهمیت فزاینده‌ای پیدا می‌کند که خود منجر به استفاده‌ی گسترده‌تر از زنجیره‌ی بلوکی در ابعاد دیگر نیز می‌گردد. بدیهی است که طرح‌های مبتنی بر زنجیره‌ی بلوکی در سیستم‌های توزیع نیازمند مطالعه و ارزیابی گسترده در خصوص مقیاس‌پذیری، الگوریتم صحت‌سنجی، متن قرارداد هوشمند و حاکم بر زنجیره، ایجاد تعادل میان امنیت سایبری و اندازه‌ی زنجیره و نیز نحوه‌ی دسترسی اعضا به زنجیره‌ی پیشنهادی می‌باشد.

مراجع

[1] Crosby, M., Nachiappan, et al, "Blockchain Technology: Beyond Bitcoin", Applied Innovation Review, Issue No. 2, Sutardja Center, UC Berkeley, 2016.

[2] Monrat, A., Schelen, O. & Andersson, K., "A Survey of Blockchain from the Perspective, Challenges and Opportunities", IEEE Access, Vol. 7, pp. 117134-117151, 2019.

[3] Guo, Y. & Liang, C., "Blockchain application and outlook in the banking industry". Financ Innov, Vol. 2, No. 24, 2016.

[4] Yousuf, S., & Svetinovic, D., "Blockchain Technology in Supply Chain Management: Preliminary Study," 2019 Sixth International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security (IOTSMS), pp. 537-538, Granada, Spain, 2019,

[5] Wang , S., et al., "Blockchain-Powered Parallel Healthcare Systems Based on the ACP Approach," in IEEE Transactions on Computational Social Systems, Vol. 5, No. 4, pp. 942-950, 2018.

[6] Kshetri, N., & Voas, J., "Blockchain-Enabled E-Voting," in IEEE Software, Vol. 35, No. 4, pp. 95-99, July/August 2018.

[7] Qu, Y,. Pokhrel, S. R., Garg, S., Gao, L. & Xiang, Y., "A Blockchained Federated Learning Framework for Cognitive Computing in Industry 4.0 Networks," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 17, No. 4, pp. 2964-2973, 2021.

[8] Liu, N., Tan, L., Zhou, L., & Chen, Q., "Multi-party Energy Management of Energy Hub: A Hybrid Approach with Stackelberg Game and Blockchain," in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, Vol. 8, No. 5, pp. 919-928, 2020.

[9] Li, Z., & Shahidehpour, M., "Cyber-secure Decentralized Energy Management for IoT-enabled Active Distribution Networks," in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, Vol. 6, No. 5, pp. 900-917, 2018.

[10] Che, L., & Shahidehpour, M., "DC Microgrids: Economic Operation and Enhancement of Resilience by Hierarchical Control," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 5, pp. 2517-2526, 2014.

[11] Li, Y., & Nejabatkhah, F., "Overview of control, integration and energy management of microgrids," in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 2, no. 3, pp. 212-222, 2014.

[12] Haber, S. & Stornetta, W.S., "How to time-stamp a digital document", Journal of Cryptology, No. 3, 99–111, 1991.

[13] Bayer, D., Haber S. & Stornetta, W.S.,"Improving the Efficiency and Reliability of Digital Time-Stamping", Springer, 1993.

[14] Nakamoto, S., "Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System", 2009.

[15] Rahouti, M., Xiong, K., & Ghani, N., "Bitcoin Concepts, Threats, and Machine-Learning Security Solutions," in IEEE Access, Vol. 6, pp. 67189-67205, 2018.

[16] Zaghloul, E., Li, T., Mutka, M. W., & Ren, J., "Bitcoin and Blockchain: Security and Privacy," in IEEE Internet of Things Journal, Vol. 7, No. 10, pp. 10288-10313, 2020.

[17] Li, Zh., Bahramirad, Sh., Paaso, A., Yan, M. & Shahidehpour, M.,"Blockchain for Decentralized Transactive Energy Management System in Networked Microgrids", The Electricity Journal, Vol. 32, No. 4, pp. 58-72, 2019.

[18] Ali Syed, T., Alzahrani, A., Jan, S., Siddiqui, M. S., Nadeem, A., & Alghamdi, T., "A Comparative Analysis of Blockchain Architecture and its Applications: Problems and Recommendations," in IEEE Access, Vol. 7, pp. 176838-176869, 2019.

[19] Zhang, P., & Zhou, M., "Security and Trust in Blockchains: Architecture, Key Technologies, and Open Issues," in IEEE Transactions on Computational Social Systems, Vol. 7, No. 3, pp. 790-801, 2020.

[20] Shahnaz, A., Qamar, U. & Khalid, A., "Using Blockchain for Electronic Health Records", IEEE Access, Vol. 7, pp. 147782-147795, 2019.

[21] Singh S. & Singh, N., "Blockchain: Future of financial and cyber security," 2016 2nd International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), Greater Noida, India, 2016, pp. 463-467.

[22] Gourisetti, S. N. G., Mylrea, M., & Patangia, H., "Evaluation and Demonstration of Blockchain Applicability Framework," in IEEE Transactions on

Engineering Management, Vol. 67, No. 4, pp. 1142-1156, 2020.

[23] Martins, V. F., & Borges, C. L. T., "Active Distribution Network Integrated Planning Incorporating Distributed Generation and Load Response Uncertainties," in IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 4, pp. 2164-2172, 2011.

[24] Ramezan, G., & Leung, C., "Analysis of Proof-of-Work-Based Blockchains Under an Adaptive Double-Spend Attack," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 16, No. 11, pp. 7035-7045, 2020.

[25] Nguyen, C. T., Hoang, D. T., Nguyen, D. N., Niyato, D., Nguyen, & Dutkiewicz, E., "Proof-of-Stake Consensus Mechanisms for Future Blockchain Networks: Fundamentals, Applications and Opportunities," in IEEE Access, Vol. 7, pp. 85727-85745, 2019.

[26] Zheng, S. Xie, H. Dai, X. Chen & H. Wang, "An Overview of Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends", IEEE International Congress on Big Data, Honolulu, HI, pp. 557-564, 2017.

[27] Jin. D., Hannon, C., Li, Z., et al, "Smart street lighting system: a platform for innovative smart city applications and a new frontier for cyber security", The Electricity Journal, Vol. 29, No. 10, pp. 28-35, 2016.

[28] Emilio, G., Pilo, F., "Smart Inverter Operation in Distribution Networks with High Penetration of Photovoltaic Systems", J Mod Power Syst Clean Energy, Vol 3. No.4, pp. 504-511, 2015.

[29] Zubo, R. H. A., & Mokryani, G., "Active Distribution Network Operation: A Market-Based Approach," in IEEE Systems Journal, Vol. 14, No. 1, pp. 1405-1416, 2020.

[30] Hu, Z., & Li, F., "Cost-Benefit Analyses of Active Distribution Network Management, Part I: Annual Benefit Analysis," in IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, No. 3, pp. 1067-1074, 2012.

[31] Koutsoukis, N. C., Siagkas, D. O., Georgilakis, P. S. & Hatziargyriou, N. D., "Online Reconfiguration of Active Distribution Networks for Maximum Integration of Distributed Generation," IEEE Trans. on Automation Science and Engineering, Vol. 14, No. 2, pp. 437-448,2017.

[32] Feng, C., Li, Z., Shahidehpour, M., Wen, F., Liu, W., & Wang, X., "Decentralized Short-Term Voltage Control in Active Power Distribution Systems," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 5, pp. 4566-4576, 2018.

[33] Barbierato, L. et al., "A Distributed IoT Infrastructure to Test and Deploy Real-Time Demand Response in Smart Grids," in IEEE Internet of Things Journal, Vol. 6, No. 1, pp. 1136-1146, 2019.

[34] Kulkarni, S., et al., "Enabling a Decentralized Smart Grid Using Autonomous Edge Control Devices," in IEEE Internet of Things Journal, Vol. 6, No. 5, pp. 7406-7419, 2019.

[35] Wang, P., & Govindarasu, M., "Multi-Agent Based Attack-Resilient System Integrity Protection for Smart Grid," in IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 11, No. 4, pp. 3447-3456, 2020.

[36] Wang, B., Dabbaghjamanesh, M., Kavousi-Fard, A., & Mehraeen, S., "Cybersecurity Enhancement of Power Trading Within the Networked Microgrids Based on Blockchain and Directed Acyclic Graph Approach," in IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 55, No. 6, pp. 7300-7309, 2019.

[37] Bedi, G., Venayagamoorthy, G. K., Singh, R., Brooks, R. R., & Wang, K., "Review of Internet of Things (IoT) in Electric Power and Energy Systems," in IEEE Internet of Things Journal, Vol. 5, No. 2, pp. 847-870, 2018.

[38] Wu, H., & Shahidehpour, M., "Applications of Wireless Sensor Networks for Area Coverage in Microgrids," in IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 3, pp. 1590-1598, 2018.

[39] Jacobs, N., Hossain-McKenzie, S., Summers, A., Jones, C. B., Wright, B., & Chavez, A., "Cyber-Physical Observability for the Electric Grid," 2020 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), College Station, TX, USA , pp. 1-6, 2020.

[40] Chen, L, Jia, M, Yuan, X. & Qiang, H, "Construction and application research of Active Distribution Network Situation Awareness System," 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Xi'an, China, 2016, pp. 863-869.

[41] Xiang, Y., Lu, X., Yu, Z., Shi, D., Li, H., & Wang, Z., "IoT and Edge Computing Based Direct Load Control for Fast Adaptive Frequency Regulation," 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Atlanta, GA, USA, 2019, pp. 1-5.

[42] Gheisarnejad, M., & Khooban, M. H., "IoT-Based DC/DC Deep Learning Power Converter Control: Real-Time Implementation," in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 35, No. 12, pp. 13621-13630, 2020.

[43] Islam, M. R., Lu, H., Hossain, M. J., & Li, L., "An IoT-Based Decision Support Tool for Improving the Performance of Smart Grids Connected With Distributed Energy Sources and Electric Vehicles," in IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 56, No. 4, pp. 4552-4562, July-Aug. 2020.

[44] Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram S., Geach, D., Jenkins, D., McCallum, P., Peacock, A., "Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities," in Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 100, pp. 143-174, 2019.

[45] Li, Y., Nejabatkhah, F., "Overview of control, integration and energy management of microgrids", J. Mod. Power Syst. Clean Energy,No. 2, pp. 212–222, 2014.

[46] Ma, S., Chen, B., & Wang, Z., "Resilience Enhancement Strategy for Distribution Systems Under Extreme Weather Events," IEEE Tranactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 2, pp. 1442-1451, 2018.

[47] Li, Z., Shahidehpour, M., Alabdulwahab, A., & Abusorrah, A., "Bilevel Model for Analyzing Coordinated Cyber-Physical Attacks on Power Systems," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, No. 5, pp. 2260-2272, 2016.

[48] Liu, Y., Fan, R., & Terzija, V., "Power system restoration: a literature review from 2006 to 2016," J. Mod. Power Syst. Clean Energy, Vol. 4, No. 3, pp. 332-341, 2016.

[49] Shahidehpour, M., Li, Z., Bahramirad, S., & Tian, W., "Networked Microgrids: Exploring the Possibilities of the IIT-Bronzeville Grid," IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 15, No. 4, pp. 63-71, 2017.

[50] Farzin, H., Fotuhi-Firuzabad, M., & Moeini-Aghtaie, M., "Enhancing Power System Resilience Through Hierarchical Outage Management in Multi-Microgrids," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, No. 6, pp. 2869-2879, 2016.

[51] Baek, J., Vu, Q. H., Liu, J. K., Huang, X., & Xiang, Y., "A Secure Cloud Computing Based Framework for Big Data Information Management of Smart Grid," IEEE Transactions on Cloud Computing, Vol. 3, No. 2, pp. 233-244, 2015.

[52] Armbrust, M., Fox, A., Griffith, R., et al, "A View of Cloud Computing," Commun ACM, Vol. 53, No. 4, pp. 50-58.
[53] https://aws.amazon.com/ec2/.
[54] https://cloud.google.com/solutions/iot/.
[55] https://www.salesforce.com/products/.
[56] Christidis, K., & Devetsikiotis, M., "Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things," IEEE Access, Vol. 4, pp. 2292-2303, 2016,
[57] Bera, S., Misra, S., & Rodrigues, J. J. P. C., "Cloud Computing Applications for Smart Grid: A Survey," in IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 26, No. 5, pp. 1477-1494, 2015.
[58] Sengupta, A., Tandon, R., & Simeone, O., "Fog-Aided Wireless Networks for Content Delivery: Fundamental Latency Tradeoffs," in IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 63, No. 10, pp. 6650-6678, 2017.
[59] Jiang, Q., Ma, J., & Wei, F., "On the Security of a Privacy-Aware Authentication Scheme for Distributed Mobile Cloud Computing Services," in IEEE Systems Journal, Vol. 12, No. 2, 2018.
[60] Awad, A., Matthews, A., Qiao, Y., & Lee, B., "Chaotic Searchable Encryption for Mobile Cloud Storage," in IEEE Transactions on Cloud Computing, Vol. 6, No. 2, pp. 440-452, 2018.
[61] Gregoratti, D., & Matamoros, J., "Distributed Energy Trading: The Multiple-Microgrid Case," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 4, pp. 2551-2559, 2015.
[62] Liu, Y., Fan, R., & Terzija, V., "Power System Restoration: a literature review from 2006 to 2016," in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, Vol. 4, No. 3, pp. 332-341, 2016.
[63] Lin, H., et al, "Self-Healing Attack-Resilient PMU Network for Power System Operation," in IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 3, pp. 1551-1565, 2018.
[64] Gai, K., Guo, J., Zhu, L. & Yu, S., "Blockchain Meets Cloud Computing: A Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 22, No. 3, pp. 2009-2030, thirdquarter 2020.
[65] Sharma, P. K., Chen, M., & Park, J. H., "A Software Defined Fog Node Based Distributed Blockchain Cloud Architecture for IoT," IEEE Access, Vol. 6, pp. 115-124, 2018.
[66] Wang, S., Ouyang, L., Yuan, Y., Ni, X., Han, X., & Wang, F., "Blockchain-Enabled Smart Contracts: Architecture, Applications, and Future Trends," in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, Vol. 49, No. 11, pp. 2266-2277, 2019.
[67] Pinna, A., Ibba, S., Baralla, G., Tonelli,, R. & Marchesi, M., "A Massive Analysis of Ethereum Smart Contracts Empirical Study and Code Metrics," in IEEE Access, Vol. 7, pp. 78194-78213, 2019.
[68] Kemmoe, V. Y., Stone, W., Kim J., Kim, D. & Son, J., "Recent Advances in Smart Contracts: A Technical Overview and State of the Art," in IEEE Access, Vol. 8, pp. 117782-117801, 2020.
[۶۹] نعمت‌خواه فرگل، امینی‌فر فرخ، "انرژی تراکنشی: راهکاری نوین و موثر برای مدیریت سمت تقاضای مصرف برق،" نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران،۱۳۹۹.
[۷۰] کریمی حمید، جدید شهرام، "تعیین قیمت بهینه برای برنامه های پاسخگویی بار با هدف بهبود همزمان سود مصرف کنندگان و ضریب بار شبکه." نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۳۹۹.
[71] Chen, S., & Liu, C., "From demand response to transactive energy: state of the art," Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, Vol. 5, No. 1, pp. 10-19, 2017.
[72] Nunna, H. S. V. S. K. & Srinivasan, D., "Multiagent-based transactive energy framework for distribution systems with smart microgrids," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 13, No. 5, pp. 2241-2250, 2017.
[73] Liu, Y., Li, Y., & Gooi, H. B., "Distributed Robust Energy Management of a Multi-Microgrid System in the Real-Time Energy Market," 2019 IEEE PESGM, Atlanta, GA, USA, pp. 1-1, 2019.
[74] Morstyn, T., Teytelboym, A. & Mcculloch, M. D., "Bilateral Contract Networks for Peer-to-Peer Energy Trading," in IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 10, No. 2, pp. 2026-2035, 2019.
[75] Seven, S., Yao, G., Soran, A., Onen, A., & Muyeen, S. M., "Peer-to-Peer Energy Trading in Virtual Power Plant Based on Blockchain Smart Contracts," in IEEE Access, Vol. 8, pp. 175713-175726, 2020.
[76] Hahn, A., Singh, R., Liu, C., & Chen, S., "Smart contract-based campus demonstration of decentralized transactive energy auctions," ISGT, pp. 1-5, 2017.

زیرنویس‌ها

[1] Facebook
[2] Blockchain
[3] Bitcoin
[4] Distributed Energy Resources (DER)
[5] Microgrid
[6] Internet of Things (IoT)
[7] Time Stamping
[8] Hash Encryption
[9] Satoshi Nakamoto
[10] Mining
[11] Miner
[12] Decentralized
[13] Header
[14] Merkel tree
[15] Nonce
[16] Consensus Algorithm
[17] Byzantine Generals (BG) Problem
[18] Proof of Work (PoW)
[19] Proof of Stake (PoS)
[20] Active Distribution Network (ADN)
[21] Power Electronic Inverters
[22] Voltage Regulators
[23] Mesh
[24] Voltage Rises
[25] Switchable Lines
[26] On-load Tap Changing Transformers
[27] Static Var Compensators
[28] Time-of-Use
[29] Tablet
[30] Cloude Services
[31] Micropayment
[32] Machine Learning
[33] Behind the Meter
[34] Flexibility Services

[35] Reactive Power
[36] Networked Microgrids
[37] Distribution System Operator (DSO)
[38] Independent System Operaator (ISO)
[39] MicroGrid Master Controller (MGMC)
[40] Cloud Computing
[41] Server
[42] Man-in-the-Middle Attack
[43] Denial-of-Service Attack
[44] Edge Computing
[45] Software-defined Networking (SDN)
[46] Smart Contracts
[47] Self-Executable Scripts
[48] Transactive Microgrids