

شبکه هوشمند؛ نظامی نوین در صنعت برق

محمود فتوحی فیروز آباد* و محمد رستگار**

چکیده: در دو دهه اخیر با توجه به روند رو به رشد مصرف انرژی الکتریکی و محدودیت منابع دولتی، موضوع خصوصی سازی و تجدید ساختار صنعت برق مورد توجه قرار گرفته است. فرسودگی تجهیزات شبکه های موجود از یک سو و ظهور فناوریهای نوین از سوی دیگر، صنعت برق را با چالشهای جدیدی روبه رو کرده است. در نگاه کلی، شبکه هوشمند^۱ راهکاری برای حل چالشهای شبکه کنونی شامل چالشهای قابلیت اطمینان، چالشهای زیست محیطی و چالشهای بازدهی انرژی ارائه می کند. از دیدگاه قابلیت اطمینان، شبکه هوشمند با پایش وضعیت المانها، تعمیر و نگهداری مبتنی بر وضعیت و ارائه راهکارهایی نوین تعداد و مدت زمان خاموشیها را کاهش می دهد. از منظر محیط زیست، شبکه هوشمند به دنبال حل موانع موجود در مسیر استفاده گسترده از منابع تولید پاک و تجدیدپذیر است. از نظر اقتصادی و بهره وری انرژی، شبکه هوشمند با ایجاد قابلیت پایش بی درنگ مصرف و مدلسازی دقیق تر منابع تولید، موجب بهره برداری اقتصادی تر از شبکه می شود. بنا بر اهمیت هوشمندسازی شبکه و همچنین، توجه بسیاری از مراکز تحقیقاتی و صنعتی به این زمینه، در این مقاله به شبکه هوشمند به عنوان نظامی نوین برای حل این چالشها پرداخته شده است. منابع تولید پراکنده، خودروهای الکتریکی هیبرید و منابع سمت تقاضا از جمله مهم ترین فناوریها و مفاهیمی هستند که در قالب شبکه توزیع هوشمند در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است. در انتها، به نقش سیستم های مخابراتی در هوشمند سازی شبکه و چالش امنیت اطلاعات پرداخته شده است.

واژه های کلیدی: شبکه هوشمند، قابلیت اطمینان، محیط زیست، بهره وری انرژی، شبکه توزیع هوشمند.

* استاد و رئیس دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. fotuhi@sharif.edu

** دانشجوی دکتری مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. rastegar_m@ee.sharif.edu

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۳/۸)

(پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/ ۸/۲۷)

۱. مقدمه

فناوریهای مختلفی در سالهای اخیر ظهور یافته‌اند که دیدگاه صاحبان صنعت برق را در خصوص نحوه تولید، انتقال و تحویل انرژی الکتریکی به متقاضیان تغییر داده است، فناوریهایی مانند تولیدات پراکنده و خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال به شبکه که به کاهش آلودگی محیط زیست کمک می‌کنند و گزینه‌های مناسب و پایداری برای انرژی به شمار می‌روند. همچنین، گسترش ابزاری همچون زیرساختهای اندازه‌گیری پیشرفته و سیستم‌های مدیریت انرژی خانه امکان مدیریت بهینه‌تر انرژی را فراهم می‌آورد [۱ و ۴].

در این خصوص، از ابتکار مفهوم شبکه‌های هوشمند با هدف به روز کردن شبکه‌های برق کنونی و معرفی مجموعه‌ای از فناوریها و خدمات جدید، که شبکه‌های برق را قابل اطمینان‌تر، بهینه و دوستدار محیط زیست می‌سازد، به شدت استقبال شده است. در دهه اخیر، واژه شبکه هوشمند به واژه آشنایی تبدیل شده است. بر اساس تعریف سازمان انرژی ایالات متحده آمریکا، شبکه هوشمند یک شبکه گسترده انرژی خودکار است که در آن انتقال توان الکتریکی و تبادل اطلاعات به صورت دوطرفه صورت می‌گیرد. این شبکه قابلیت پایش و پاسخگویی به هر نوع تغییرات در شبکه، از منابع تولید تا مصرف‌کنندگان و حتی تک تک تجهیزات را دارد [۵].

در نگاه کلی، شبکه هوشمند راهکاری را برای حل چالشهای شبکه کنونی، که در مثلث شکل ۱ اشاره شده است، ارائه می‌کند، مانند چالشهای قابلیت اطمینان، چالشهای زیست محیطی و چالشهای اقتصادی و بازدهی انرژی [۶].

-
1. Distributed Generation (DG)
 2. Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)
 3. Advanced Metering Infrastructure (AMI)
 4. U.S. Department of Energy (DOE)
 5. Automated
 6. Monitoring

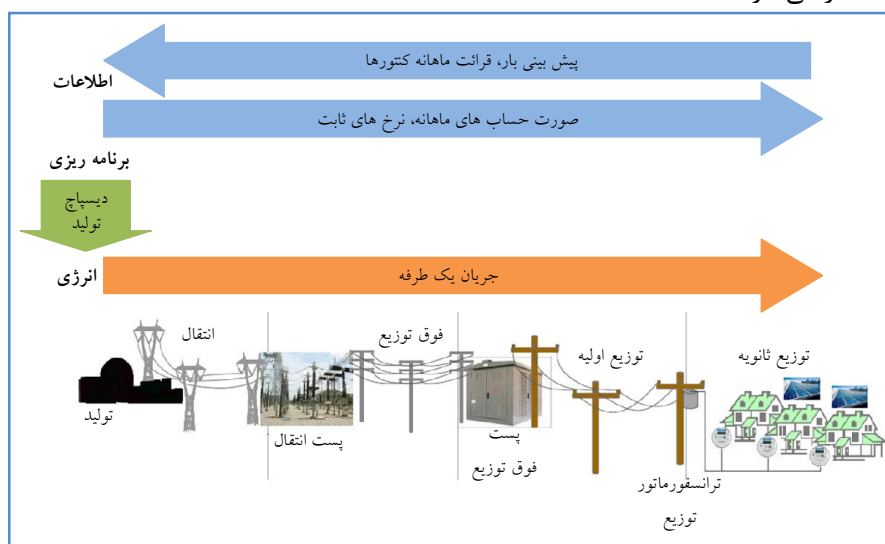


شکل ۱: چالش‌های پیش‌روی شبکه هوشمند

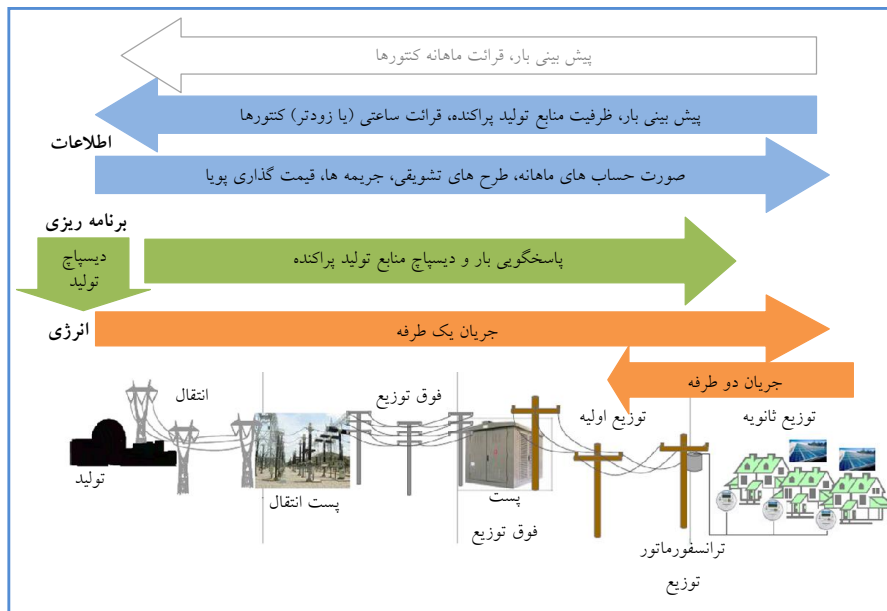
از دیدگاه قابلیت اطمینان، شبکه هوشمند نیاز شبکه فرسوده قدرت است. شبکه الکترومکانیکی موجود ظرفیت تأمین تقاضاهای چندین برابر شده را ندارد. کاملاً طبیعی به نظر می‌رسد شبکه‌ای که برای قرن پیش طراحی شده است، علاوه بر اینکه اجزای کهنه‌ای دارد و از فناوری روز بی‌بهره است، قابلیت تأمین چنین باری را نداشته باشد [۷ و ۸]. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰ میزان تقاضا سه برابر مصرف کنونی خواهد شد. بنابراین، نیاز مبرم شبکه قدرت امروزی تغییر در ساختار برای روشن نگاه داشتن چراغ خانه مشترکان است. خروجی‌های ناگهانی و بی‌برنامه که لطمات فراوانی را به مصرف‌کنندگان وارد می‌کند، از دیگر مواردی است که در شبکه‌های قدرت امروزی رو به افزایش است. علاوه بر تعداد، مدت زمان خروج نیز حایز اهمیت است و باید کاهش یابد [۵]. در نتیجه، باید به دنبال راهکارهایی برای کاهش تعداد و مدت زمان خاموشیها بود. از نظر محیط زیست، شبکه هوشمند به دنبال حل موانع موجود در راه استفاده گسترده از منابع تولید پاک و تجدیدپذیر است. هوشمندسازی شبکه شامل پیاده‌سازی منابع تولید پراکنده پربازده و تجدیدپذیر در محل بارهای صنعتی، تجاری و خانگی است. از طرف دیگر، استفاده از برنامه‌های

۵۰ شبکه هوشمند؛ نظامی نوین در صنعت برق

پاسخگویی بار و افزایش بهره‌وری مصرف با فرض هوشمندسازی شبکه، موجب کاهش بار و در نتیجه، کاهش آلودگی ناشی از تولید انرژی می‌شود. از نظر اقتصادی و بهره‌وری انرژی، شبکه هوشمند با ایجاد قابلیت پایش بی‌درنگ مصرف و مدلسازی دقیق‌تر منابع تولید، موجب بهره‌برداری اقتصادی‌تر از شبکه می‌شود [۹]. بهره‌برداری بهینه از سیستم موجب کاهش قیمت‌های برق می‌شود و رضایت مصرف‌کنندگان را به دنبال دارد. با توجه به تعاریف ارائه شده، می‌توان گفت که مهم‌ترین تفاوت شبکه قدرت سنتی و هوشمند در جهت و نحوه انتقال اطلاعات و انرژی و نحوه برنامه‌ریزی برای آنهاست. مقایسه شکل‌های ۲ و ۳ این تفاوتها را آشکار می‌سازد.



شکل ۲: جریان انرژی و اطلاعات در ساختار سنتی



شکل ۳: جریان انرژی و اطلاعات در شبکه هوشمند

از دیدگاه انتقال اطلاعات، در شبکه سنتی اطلاعاتی که از سمت مصرف به سمت تولید منتقل می‌شود، شامل قرائت‌های ماهانه کنتورهای مصرف‌کنندگان است. اما در شبکه هوشمند، علاوه بر اینکه قرائت کنتورها به صورت ساعتی (یا زودتر) انجام می‌شود، پیش‌بینی بار به صورت دقیق‌تر و با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته هوشمند صورت می‌گیرد. علاوه بر اینها، در شبکه هوشمند داده‌های دیگری که شامل مشخصات و ظرفیت منابع تولید سمت تقاضاست، به سمت تولید منتقل می‌شود. در شبکه کنونی اطلاعاتی که از سمت تولید به سمت مصرف منتقل می‌شود، شامل قیمت‌های ثابت برق و صورت‌حساب‌های ماهیانه است. در شبکه هوشمند صورت‌حسابها همچنان به صورت ماهیانه صادر می‌شود، با این تفاوت که قیمت‌های متغیر برق به صورت ساعتی یا حتی کمتر به مصرف‌کنندگان اعلام می‌شود. علاوه بر این، مشوق‌های شرکت در برنامه‌های پاسخگویی بار و جریمه‌های پاسخ ندادن به برنامه‌ها، اطلاعات جدیدی هستند که از سمت تولید به سمت مصرف منتقل می‌شود.

از دیدگاه برنامه‌ریزی، در شبکه سنتی برنامه‌ریزی فقط برای واحدهای تولید انجام می‌شود، اما در شبکه هوشمند علاوه بر واحدهای تولید، برنامه‌ریزی برای منابع انرژی سمت تقاضا (پاسخگویی بار، تولیدات پراکنده و تجدیدپذیر) نیز انجام می‌شود.

از دیدگاه انتقال انرژی، در شبکه سنتی انرژی الکتریکی را واحدهای بزرگ و سنتی تولید و به مصرف‌کنندگان منتقل می‌کنند، اما در شبکه هوشمند منابع انرژی دیگری نیز در سمت تقاضا وجود دارند که نه تنها بخشی از تقاضای مشترکان را تولید می‌کنند، بلکه می‌توانند قسمتی از آن را نیز به شبکه تزریق کنند. لذا، در شبکه هوشمند جریان انرژی یک جریان دو سویه است [۱۰].

در ادامه مقاله پس از تبیین انتظارات از شبکه هوشمند به هوشمندسازی شبکه توزیع به‌عنوان مهم‌ترین بخش از هوشمندسازی شبکه پرداخته و مبانی هوشمندسازی در شبکه توزیع ارائه شده است. در نهایت، پس از معرفی مبانی با اشاره کوتاهی به موضوع مهم امنیت اطلاعات در شبکه‌های هوشمند در بخش چهارم، در بخش پنجم جمع‌بندی مطالب ارائه شده است.

۲. انتظارات از شبکه هوشمند

امروزه، بیشتر مراکز تحقیقاتی و صنعتی با همراهی شرکت‌های برق دنیا به این نتیجه رسیده‌اند که شبکه هوشمند یک نیاز و ضرورت است. شبکه هوشمند نه یک شبکه تازه تأسیس، بلکه شکل تکامل یافته شبکه امروزی است که باید نقاط ضعف شبکه کنونی را برطرف سازد. بنابراین، شبکه هوشمند همان شبکه امروزی با افزودن قابلیت‌های پیش، تحلیل دقیق، کنترل و امکانات مخابراتی برای پاسخگویی فوری به هرگونه اتفاق در شبکه است. مدیریت بار با حضور پویای مشترکان، بالا بردن بازدهی اقتصادی از طریق مدیریت داراییها، قابلیت اطمینان بالاتر، امنیت بیشتر و ایجاد محیطی پاک‌تر و سبزتر با حضور تولیدات پراکنده از اهم مزایای هوشمندسازی شبکه است [۱۱]. در ادامه، انتظارات از شبکه هوشمند به اختصار توضیح داده شده است.

۲.۱. دستیابی به بازدهی بالاتر

گسترش سیستم قدرت علاوه بر اینکه کنترل، تعمیر و نگهداری، مدیریت دارایی و مراقبت از سیستم را مشکل‌تر می‌کند، هزینه سرمایه‌گذاری را نیز به کلیه شرکت‌های تولید و انتقال و توزیع تحمیل می‌کند. بنابراین، اگر بتوان بازدهی سیستم را افزایش داد، علاوه بر پیشگیری از اتلاف انرژی، از بخشی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری نیز جلوگیری می‌شود [۱۲]. این مهم می‌تواند با راهکارهایی همچون تعمیر و نگهداری مبتنی بر وضعیت به‌جای مبتنی بر زمان و همچنین، پاسخگویی سریع به اتفاقات در شبکه هوشمند میسر شود.

-
1. Asset management
 2. Condition-based
 3. Time-based

۲.۲. قابلیت خود اصلاحی سیستم

در حال حاضر تقریباً در بیشتر شبکه‌های قدرت دنیا، حتی شبکه قدرت کشورهای صنعتی و پیشرفته، تنها راهی که بهره‌بردار از خاموشیها مطلع می‌شود، تماس تلفنی مشترکان است [۵]. اگر اطلاعات شبکه به صورت بی‌درنگ یا نزدیک به آن در اختیار بهره‌بردار قرار گیرد و مراکز کنترل به صورت راه دور فعالیت کنند، به‌گونه‌ای که بهره‌بردار با پایش خطای رخ داده در شبکه اقدامات لازم را انجام دهد یا ابزارهای قابل کنترل در سیستم انتقال یا توزیع به‌صورت خودکار پاسخی سریع به اتفاق رخ داده در شبکه بدهد، به میزان چشمگیری از تعداد و مدت زمان خاموشیها کاسته می‌شود و از خروجیهای بزرگ و ناپایداری در شبکه جلوگیری به عمل می‌آید [۹]. بررسیها نشان می‌دهد که یکی از دلایل عمده‌ای که خروجیهای بزرگ اخیر را موجب شده است، پاسخ کند سویچهای مکانیکی، وجود نداشتن تحلیل خودکار و ضعف در رؤیت شبکه است. ایجاد قابلیت رؤیت شبکه به همراه ایجاد مراکز خودکار کنترل از راه دور، استفاده از ابزارهای دیجیتال و مکانیزه که قابلیت عملکرد خودکار نیز داشته باشند، می‌تواند شبکه را هوشمندتر کند و با ایجاد قابلیت اصلاح سیستم، میزان خاموشیهای شبکه را کاهش دهد [۱۳ و ۱۴].

۲.۳. گسترش سیستم‌های کنترلی و مخابراتی شبکه قدرت

سیستم‌های مخابرات از راه‌حلهای اختصاصی به سمت راه‌حلهای استاندارد حرکت کرده‌اند که در آن فروشندگان بیشتر از آنکه طراح سیستم کنترل باشند، سازندگان سیستم هستند. بنابراین، در شبکه هوشمند سیستم‌های کنترل، که به شکل جزیره‌های اتوماسیونی بودند، با هم مرتبط و مجتمع و تحت نظارت یک مرکز کنترل اداره می‌شوند. سیستم مخابرات شبکه قدرت رگ حیات این شبکه است. این سیستم پیش‌نیاز عملکرد و کنترل مؤثر شبکه قدرت است. علاوه بر این، با توجه به نیازمندیهای جدید در خصوص امنیت اطلاعات، این سیستم بیشتر مورد توجه قرار خواهد گرفت [۱۵].

۲.۴. افزایش قابلیت اطمینان سیستم قدرت

یکی از مواردی که در سیستم‌های امروزی بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد، افزایش عمر مفید المانهای شبکه و کاهش نرخ خرابی است. این کار با استفاده بهینه از المانهای سیستم می‌تواند میسر شود. شبکه هوشمند این امکان را با پایش وضعیت المانها فراهم می‌سازد تا در صورت رؤیت اختلال در عملکرد آن المان، اقدامات لازم انجام شود. روش دیگر برای بالا بردن قابلیت اطمینان، تعمیر و

نگهداری به موقع است. تعمیر و نگهداری نباید آنچنان زود به زود انجام شود که هزینه اضافی تحمیل کند و نه دیر هنگام که نرخ خرابی بیش از حد انتظار افزایش یابد. شبکه هوشمند در حقیقت، تعمیر و نگهداری را از حالت مبتنی بر زمان در سیستم قدیمی به حالت مبتنی بر وضعیت^۲ تبدیل می کند؛ یعنی در شبکه قدرت تعمیر و نگهداری بر اساس اطلاعاتی که به صورت بی درنگ دریافت می شود، صورت می پذیرد [۱۱]. همچنین، اقداماتی همچون مانور برای تأمین بار قطع شده از فیدری دیگر یا جداسازی قسمت خطا دیده و تأمین بار قطع شده از طریق واحدهای تولید پراکنده نصب شده در نزدیکی آن موجب کاهش خاموشیها و انتظار انرژی تأمین نشده خواهد شد.

۵.۲. پذیرش تولیدکننده های پراکنده سنتی و تجدیدپذیر

واحدهای تولیدی که به دلیل پراکندگی در شبکه با عنوان تولیدکننده های پراکنده خوانده می شوند، تولیدکننده هایی سنتی یا تجدیدپذیر هستند که حداکثر در حد چند مگاوات قابلیت تولید توان دارند و می توانند برای تأمین بار یک سالن ورزشی، یک بیمارستان، یک واحد صنعتی کوچک یا حتی واحدهای مسکونی به کار روند. تولیدکننده بادی و تولیدکننده فتوولتایی جزء معروف ترین واحدهای تجدیدپذیر پراکنده هستند. ویژگی ممتاز آنها تولید نکردن گازهای گلخانه ای و به اصطلاح سبز بودن است؛ به خصوص با فشار سازمانهای حمایت از محیط زیست جهانی استفاده از این تولیدکننده ها رو به افزایش است. به مجموعه ای از این واحدها که در کنار یکدیگر به صورت به هم پیوسته امکان تأمین بار یک ناحیه را فراهم می آورند، ریزشبهه گفته می شود. اتصال ریزشبهه به شبکه اصلی و بالادستی نیازمند فراهم آمدن شرایطی است که پایداری را برهم نزند، امکان انتقال توان بین شبکه اصلی و ریزشبهه فراهم باشد، امکان جدا شدن ریزشبهه هنگام وقوع خطا در شبکه اصلی وجود داشته باشد و کنترل فرکانس و ولتاژ به خوبی انجام گیرد. شبکه هوشمند باید امکان و ظرفیت پذیرش واحدهای این چنینی و سنکرون سازی آنها با شبکه را فراهم آورد [۶].

۶.۲. فعالسازی مصرف کنندگان

یکی از مزایای مهم شبکه هوشمند امکان وارد کردن مصرف کنندگان و خریداران در مدیریت بار و داراییهای شبکه قدرت است. در شبکه امروزی، مصرف کنندگان فقط زمانی با سیستم قدرت در ارتباط هستند که قبض برق را دریافت می کنند و بر اساس محاسبات صورت گرفته در شرکتهای برق،

-
1. Time based Maintenance
 2. Condition based Maintenance
 3. Expected Energy not Supplied

پول مصرف خود را پرداخت می‌کنند. این ارتباط یک طرفه است و عملاً مصرف‌کننده نقشی ندارد. در چنین مواردی اگر مصرف‌کننده با قبض برقی با مبلغ بالا روبه‌رو شود، بدون شک سعی در کاهش مصرف خود می‌کند. اما از آنجا که نمی‌داند در چه ساعت‌هایی از شبانه روز نرخ برق مصرفی او بیشتر است، ممکن است چندان نتواند به کاهش هزینه قبض خود در دوره بعد دست یابد [۶ و ۱۲]. شبکه هوشمند این امکان را فراهم می‌سازد که علاوه بر اینکه شرکت‌های برق اطلاعات کامل و جامعی از طریق ساختار طراحی شده از مصرف‌کننده به‌دست می‌آورند، از طریق یک ارتباط دو طرفه مخابراتی، مصرف‌کنندگان نیز از میزان و قیمت انرژی مصرفی خود اطلاع می‌یابند. بدین ترتیب مصرف‌کنندگان این امکان را می‌یابند که هزینه برق مصرفی خود را کنترل کنند. میزان مصرف کاهش می‌یابد و در نتیجه، مصرف‌کنندگان بیشتری بدون احداث واحدها و تجهیزات تولید و انتقال و توزیع جدید تغذیه می‌شوند. از سوی دیگر، اگر قیمت‌گذاری منطقی انجام شود، می‌توان به مدیریت بار کمک کرد. بدین صورت که اگر بیشترین قیمت برق در ساعت‌های پرمصرف انرژی یا همان قله بار باشد، مصرف‌کنندگان برای کاهش هزینه خود میزان مصرف خود را کاهش می‌دهند و این روش اوج مصرف را کاهش می‌دهد و موجب می‌شود که منحنی بار هموارتر شود. این روش به انتقال قله بار معروف است. بر اثر انتقال قله بار ظرفیتهای جدیدی برای تولیدکننده‌ها ایجاد خواهد شد، زیرا در شرایط عادی فقط در ۱۰ درصد زمانها مصرف در اوج قرار دارد، ولی برای همین میزان اوج مصرف که معمولاً بسیار بیشتر از متوسط مصرف است، باید در شبکه ظرفیت لازم برای تأمین بار فراهم شود. بنابراین، هرچه اوج مصرف را کاهش دهیم، واحدهای آلوده‌کننده کمتری روشن می‌شوند و همچنین، ظرفیتهای جدیدی ایجاد می‌شود که سرمایه‌گذاری تولید و انتقال برای تأمین بارهای جدید را به تعویق می‌اندازد [۵]. همچنین، مصرف‌کنندگان در شبکه هوشمند با نصب تولیدکننده‌های تجدیدپذیر کوچک علاوه بر تأمین بار خود، این امکان را می‌یابند که به تبادل توان با شبکه بپردازند. به‌صورت کلی، شبکه هوشمند در سه سطح تولید، انتقال و توزیع قابل بررسی است. بسیاری از مفاهیم مطرح شده در شبکه هوشمند یا به صورت مستقیم در سطح توزیع مطرح می‌شوند یا دارای زیربنایی در سطح توزیع و مصرف‌کننده هستند. بنابراین، شایسته است که برای تبیین بیشتر هوشمندسازی به شبکه توزیع هوشمند و نیازمندیهای آن پرداخته شود. علاوه بر این، با توجه به ضرورت گسترش استفاده از سیستم‌های مخابراتی و فناوریهای مربوط در شبکه هوشمند، بحث امنیت اطلاعات از اهمیت فراوانی برخوردار است که در ادامه به این موضوع و چالشهای پیش رو نیز اشاره شده است.

۳. شبکه توزیع هوشمند

از آنجا که مشارکت دادن مشترکان از مهم‌ترین اهداف شبکه هوشمند و شبکه توزیع انرژی الکتریکی آخرین زنجیره از شبکه قدرت برای تحویل انرژی از تولید به محل مصرف است، بررسی هوشمندسازی شبکه توزیع اهمیت بسزایی دارد. هوشمندسازی و نفوذ فناوری در سیستم توزیع از پستهای توزیع گرفته تا فیدر و مشترک و حتی درون خانه‌ها را شامل می‌شود [۱۶ و ۱۷]. حرکت به سمت هوشمندسازی و ایده‌آلهای شبکه نیازمند طراحی چارچوبی مشخص است که نقشه راه هوشمندسازی شبکه قدرت نامیده می‌شود. طراحی نقشه راه بر اصول و مبنایی استوار است که به ادعای نویسندگان مقاله این مبنای در شبکه توزیع به شرح زیر هستند:

- سامانه اتوماسیون توزیع ؛
- سامانه اندازه‌گیری پیشرفته؛
- برنامه‌های پاسخگویی بار ؛
- خودروهای الکتریکی هیبرید قابل اتصال به شبکه؛
- تولیدات پراکنده تجدیدپذیر .

۳.۱. اتوماسیون توزیع

هدف از ایجاد اتوماسیون در یک سیستم انجام سریع کارهای تکراری با کمترین مداخله انسان است. در شبکه قدرت، اتوماسیون توزیع به‌عنوان سیستمی که امکان پایش، هماهنگ کردن و اعمال فرمان بر اجزای شبکه توزیع را به‌صورت بی‌درنگ و از راه دور برای شرکت توزیع فراهم می‌کند، شناخته می‌شود [۱۸]. با توجه به این تعریف می‌توان به وجود نقاط مشترکی بین اتوماسیون توزیع و اسکادای توزیع پی برد، زیرا اسکادای توزیع یک سیستم متمرکز با کلیه قابلیت‌های جمع‌آوری اطلاعات، نظارت و کنترل از راه دور تجهیزات شبکه است. معمولاً اسکادا یکی از مراحل اجرای اتوماسیون در شبکه به‌شمار می‌رود که کارکردها و قابلیت‌های پیشرفته اتوماسیون را ندارد [۱۹].

۳.۱.۱. زیرساختها و کارکردهای اتوماسیون توزیع

با توجه به هزینه‌های بالای پیاده‌سازی اتوماسیون، معمولاً هر شرکت متناسب با بودجه موجود و نیازهای شبکه به اجرای اتوماسیون در سه سطح پست، فیدر و مشترک می‌پردازد. پیاده‌سازی اتوماسیون در هر یک از این سطوح نیازمند زیرساختهای خاص خود است و همچنین، کارکردها و

قابلیتهای خاصی را نیز فراهم می‌کند. البته، بخشی از زیرساختهای مورد نیاز و قابلیت‌های به‌وجود آمده در این سه سطح مشترک است.

زیرساختهای مورد نیاز برای اجرای اتوماسیون به دو بخش نرم‌افزاری و سخت‌افزاری تقسیم می‌شوند. مهم‌ترین زیرساختهای نرم‌افزاری عبارت‌اند از:

- پروتکل‌های ارتباطی؛
 - نرم‌افزار پایش شبکه با قابلیت نمایش گرافیکی شبکه به‌طور برخط و به همراه رابط گرافیکی کاربر؛
 - نرم‌افزار کنترل هوشمند شبکه با قابلیت‌های مدیریت خطا، کنترل ولتاژ و توان راکتیو و ...؛
 - نرم‌افزارهای مالی و حسابداری با قابلیت صدور صورت‌حسابها بر اساس قیمت‌های پویا.
- همچنین، زیرساختهای سخت‌افزاری مهم نیز عبارت‌اند از:
- بستر و تجهیزات مخابراتی؛
 - تجهیزات اندازه‌گیری پیشرفته؛
 - تجهیزات حفاظتی پیشرفته؛
 - ادوات کلیدزنی قابل کنترل از راه دور؛
 - رایانه‌ها و پردازنده‌های مورد نیاز در مرکز کنترل و در سطح شبکه.

تاکنون کارکردها و قابلیت‌های زیادی برای سیستم اتوماسیون توزیع مطرح شده است که برخی از آنها در شبکه‌های توزیع اجرا شده و برخی در حد پیشنهاد باقی مانده‌اند. در ادامه مهم‌ترین این کارکردها بیان شده است. با توجه به تعدد نقاط مشترک بین قابلیت‌های اتوماسیون در دو سطح پست و فیدر، این دو سطح با هم بررسی شده‌اند.

۳.۱.۲. کارکردهای اتوماسیون در سطح پست و فیدر

در این دو سطح هدف از اجرای اتوماسیون ایجاد [همه یا بخشی از] قابلیت‌های زیر است [۱۸]:

- کنترل و پایش وضعیت (باز یا بسته بودن) کلیدها و تجهیزات حفاظتی مورد نظر در پست و فیدر و همچنین، وضعیت عملکرد پست و فیدر از نظر سرد یا گرم بودن؛
- تشخیص، مکان‌یابی و جداسازی بخش خط‌ادیده و بازگرداندن سرویس به بخش‌های سالم به‌طور خودکار و بلافاصله بعد از وقوع خطا در پست یا فیدر؛

1. Online

2. Fault Detection, Location, Isolation (FDLI)

- مانور خودکار روی شبکه بعد از وقوع خطا، به طوری که نقاط باری که در اثر قطع بخش خطا دیده بی برق شده‌اند، از قسمت‌های (فیدرهای) دیگر شبکه تغذیه شوند؛
- بازپست خودکار بعد از رفع خطاهایی با طبیعت گذرا؛
- هماهنگی بین فیوزها، ریکلوزرها و رله‌ها و سایر وسایل حفاظتی؛
- نشان دادن و ثبت اطلاعات (مکان و زمان) خطا؛
- کنترل ولتاژ باس‌ها و افت ولتاژ خطوط و فیدرها به طور خودکار؛
- کنترل توان راکتیو و کاهش تلفات و افت ولتاژ به طور خودکار؛
- تشخیص و حداقل کردن اضافه بار ترانسفورماتورها و خطوط به طور خودکار؛
- کنترل جریان گردشی ترانسفورماتورهای پست به طور خودکار؛
- متعادل کردن بارگذاری خطوط سه‌فاز و تقسیم بار بهینه بین ترانسفورماتورهای پست به طور خودکار؛
- نمایش دیاگرام پستها و فیدرها به طور برخط روی نمایشگر گرافیکی و همچنین، به روز کردن اطلاعات این دیاگرامها به طوری که وضعیت شبکه همواره به صورت بی‌درنگ قابل مشاهده باشد.

۳.۱.۳. کارکردهای اتوماسیون در سطح مشترک

در این سطح هدف از اجرای اتوماسیون ایجاد [همه یا بخشی از] قابلیت‌های زیر است [۱۸]:

- کنترل و پایش مصرف مشترکان (مشترکان عمده یا همه مشترکان) از راه دور و مانور روی شبکه به نحوی که بتوان در شرایط بحرانی مقدار مصرف و تعداد مصرف‌کننده‌ها را کنترل کرد؛
- مدیریت مصرف در مواقع عادی و اضطراری و قطع بارهای غیرضروری در زمان اوج مصرف و کاهش قله بار؛
- پایش وضعیت کنتور مصرف‌کنندگان و کشف انشعابهای غیرمجاز و تشخیص مقدار برق سرقت شده؛
- امکان قطع انشعاب مشترکان بد حساب از راه دور؛
- تشخیص نواحی با تلفات بالا و با الگوی مصرف غیرعادی؛
- بررسی شکایات مشترکان به طور خودکار؛

- ارسال پیام نشان‌دهنده قیمت پویای برق در هر بازه زمانی به مشترکان و محاسبه خودکار صورت‌حسابها بر اساس این تعرفه‌ها و ارسال صورت‌حسابها به مشترکان؛
- جمع‌آوری و پردازش داده‌های مورد نیاز به‌منظور پیش‌بینی بار برای طراحی و توسعه شبکه.

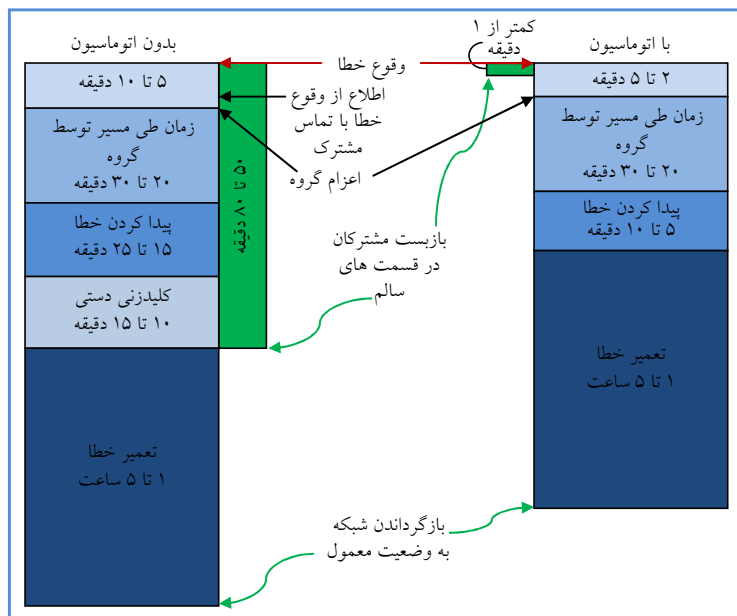
۳.۱.۴. منافع حاصل از اجرای اتوماسیون

تصمیم‌گیری در خصوص اجرای اتوماسیون، انتخاب سطوح مورد نظر و انتخاب قابلیت‌های سیستم اتوماسیون با تحلیلهای هزینه - فایده انجام می‌شود. هزینه پیاده‌سازی اتوماسیون شامل هزینه سرمایه‌گذاری برای ایجاد زیرساختها و هزینه بهره‌برداری از سیستم است، اما از جمله منافع و فواید حاصل از این طرح می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱۸]:

- افزایش قابلیت اطمینان سیستم با کاهش تعداد و مدت زمان خاموشیها؛
 - کاهش تلفات سیستم توزیع از طریق مدیریت بار و کنترل توان راکتیو؛
 - کاهش قله بار؛
 - بهبود کیفیت توان با کاهش ولتاژها و قطعیها؛
 - افزایش فروش برق با شناسایی انشعابهای غیرمجاز؛
 - افزایش عمر تجهیزات با جلوگیری از اضافه بار شدن و تشخیص به موقع عیبها؛
 - کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری (از طریق تعمیرات مبتنی بر وضعیت)؛
 - سهولت در بهره‌برداری و کاهش عامل خطای انسانی؛
 - آزادسازی ظرفیتهای موجود و تعویق در سرمایه‌گذاریهای جدید؛
 - اصلاح آمارها و داده‌ها با استفاده از سیستم جمع‌آوری اطلاعات برای طراحی و برنامه‌ریزی شبکه؛
 - سهولت و بهبود در روابط شرکت توزیع با مشترکان و جلب رضایت آنها.
- شایان ذکر است که در تحلیلهای اقتصادی ابتدا باید موارد یادشده را با مدلهای دقیق به‌صورت کمی و مالی (کاهش هزینه‌ها) بیان کرد و سپس، با توجه به هزینه‌های طرح و مطالعات هزینه - فایده در خصوص اجرای اتوماسیون، سطوح و کارکردهای آن تصمیم گرفت.
- شاید مهم‌ترین مشوق و محرک شرکتهای توزیع برای اجرای اتوماسیون تأثیر قابل توجه آن در بهبود قابلیت اطمینان سیستم باشد، به خصوص اتوماسیون در سطح فیدر که موجب بهبود چشمگیر در شاخصهای مختلف قابلیت اطمینان می‌شود.

۳. ۱. ۵. بهبود قابلیت اطمینان سیستم از طریق اتوماسیون توزیع سیستم اتوماسیون توزیع با فراهم کردن قابلیت‌هایی مانند مانور و بازیست خودکار خط‌های گذرا و مدیریت خط‌های ماندگار به‌طور خودکار و از راه دور، مدت زمان خاموشیها را کاهش می‌دهد. همچنین، این سیستم با داشتن امکان پایش کامل شبکه می‌تواند به‌طور خودکار از برخی قطعیها جلوگیری کند [برای مثال، قطعیهای ناشی از عملکرد حفاظتها در برابر اضافه بار] و تعداد قطعیها را نیز کاهش دهد.

فرایندهای مدیریت خط شامل تشخیص، مکان‌یابی و جداسازی خطا (FDLI) و بازگرداندن سرویس (SR) به قسمتهای سالم است که با اجرای خودکار این فرایندها مدت زمان خاموشیها به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. در شکل ۴ زمان خاموشی بعد از وقوع خطا در یک شبکه نمونه قبل و بعد از اجرای اتوماسیون نشان داده شده است [۲۰]. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، زمان بازیست مشترکان در قسمتهای سالم از ۵۰ تا ۸۰ دقیقه به کمتر از یک دقیقه کاهش می‌یابد. همچنین، با اجرای اتوماسیون زمان بازگرداندن شبکه به وضعیت معمول قبل از خطا نیز می‌تواند تا ۵۰ دقیقه کوتاه‌تر شود.



شکل ۴: مقایسه زمان خاموشی در یک شبکه نمونه، قبل و بعد از اجرای اتوماسیون [۲۰]

۳.۱.۶. اتوماسیون توزیع پیشرفته در شبکه هوشمند

با توجه به توضیحات بیان شده، منافع حاصل از اتوماسیون توزیع در جهت انتظارات ناشی از هوشمندسازی شبکه است. بنابراین، اجرای اتوماسیون در شبکه هوشمند با عنوان اتوماسیون توزیع پیشرفته^۱ اجرای اتوماسیون را در مواردی که در زیر به اختصار می‌آید، بهبود می‌بخشد:

- گسترش ارتباطات میان تجهیزات اتوماسیون توزیع؛
- همگام‌سازی تجهیزات حفاظتی با توجه به استفاده گسترده از تجهیزات الکتریکی هوشمند؛
- گسترش قابلیت پایش و عیب‌یابی در شبکه هوشمند؛
- افزایش قابلیت اجرای طرح‌های مدیریت بار و کنترل توان راکتیو؛
- افزایش قابلیت تحلیل شبکه با استفاده از سیستم اندازه‌گیری پیشرفته.

شایسته است در صورتی که اجرای اتوماسیون توزیع پیشرفته مدنظر باشد، مزایای اشاره شده به‌صورت کمی مطالعه و همچنین، از دریچه مباحث اقتصادی اجرای اتوماسیون توزیع پیشرفته بررسی شود.

۳.۲. سامانه اندازه‌گیری پیشرفته

اهمیت سامانه‌های اندازه‌گیری پیشرفته به اندازه‌ای است که گاهی مفهوم شبکه هوشمند با اندازه‌گیری پیشرفته یکسان تلقی می‌شود. این امر با اینکه برداشت صحیحی نیست، اما به خوبی توجیه‌کننده اهمیت سیستم اندازه‌گیری پیشرفته است. در مقدمه به این نکته اشاره شد که در اختیار داشتن اطلاعات شبکه به‌صورت بی‌درنگ مبنای بسیاری از بهره‌برداریهایی است که در شبکه هوشمند انجام می‌شود. بدون شک، تحلیل و تصمیم‌گیری بر اساس داده‌های شبکه کنونی، به‌جای بهره‌برداری بر اساس اطلاعات حاصل از شبکه در زمان خاموشی و اطلاعات گذشته سیستم، بسیاری از معضله‌های ناشی از بهره‌برداریهایی ناصحیح را رفع خواهد کرد [۲۱]. اندازه‌گیری پیشرفته عبارت است از: اندازه‌گیری و ثبت انرژی مصرفی به‌صورت ساعتی یا حتی بازه‌های کوتاه‌تر. با اندازه‌گیری پیشرفته دقیقاً مشخص می‌شود در چه زمانی چه میزان مصرف انجام شده است. داده‌ها از طریق کانال ارتباطی ایجاد شده از طریق زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته به مرکز ارسال می‌شوند و هزینه انرژی در هر زمان محاسبه می‌شود. به این سیستم کامل اندازه‌گیری و جمع‌آوری، زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته می‌گویند.

اندازه‌گیری پیشرفته امکان اندازه‌گیری کیفیت توان، مدیریت خروجها، بهبود پیش‌بینی بار و پشتیبانی برنامه‌های پاسخگویی بار مبتنی بر قیمت را فراهم می‌کند. قرائت ساعتی مصرف به پیش‌بینی بهتر بار مصرف‌کننده کمک می‌کند. کنترلهایی که به‌صورت ماهانه مصرف را ثبت می‌کنند،

هیچ اطلاعاتی راجع به مصرف لحظه‌ای مشتری نمی‌دهند، اما کنترلهای ساعتی این امکان را فراهم می‌کنند.

زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته همچنین، تعرفه‌های مبتنی بر قیمت را پشتیبانی می‌کنند. قرائت ساعت به ساعت اجازه نوآوریهای زیادی در طراحی تعرفه را می‌دهد. فرض کلیدی برای اجرای برنامه‌های مبتنی بر قیمت این است که اطلاعات قیمتی در هر زمان به مشتری داده شود. تقریباً تمام برنامه‌های پاسخگویی بار مبتنی بر قیمت، از اندازه‌گیری پیشرفته استفاده می‌کنند و کنترل هر مشتری پاسخگو با امکان ارتباط به شبکه تجهیز می‌شود. به صورت سنتی کنترلهای معمولاً برای اندازه‌گیری مصرف برق به صورت ماهانه استفاده می‌شدند. کنترل مصرف‌کنندگان بزرگ صنعتی حداکثر مصرف به KW و سایر پارامترهای کیفیت توانی را اندازه‌گیری می‌کرد. در دهه اخیر، طراحی این کنترلهای بر اساس ساختار الکترومکانیکی بوده است. در چهل سال گذشته کنترلهای الکترومکانیکی بسیار قابل اطمینان بوده‌اند. در سالهای اخیر کنترلهای از حالت الکترومکانیکی به کنترلهای حالت جامد تغییر ساختار داده‌اند. یکی از دلایل مهم نفوذ گسترده این کنترلهای به بازار قابلیت قرائت خودکار (AMR)^۱ آنهاست. با تغییر کنترلهای از ساختار الکترومکانیکی به ساختار حالت جامد (الکترونیکی)، نحوه قرائت از قرائت دستی به قرائت خودکار تغییر پیدا کرده است. امروزه، شرکت‌های توزیع برق در جهان به سمت خودکارسازی (اتوماسیون) در سطوح مختلف حرکت می‌کنند. هر چند بسیاری از شرکتها هنوز افرادی را برای خواندن کنترلهای به صورت ماهانه اعزام می‌کنند، ولی اکنون به جای کتابهای قرائت که در دهه هشتاد میلادی متداول بود، امکان انتقال اطلاعات به کتابهای الکترونیکی ایجاد شده است که بدون دخالت دست و با دقت بالا صورت می‌گیرد. اشکال روش AMR آن است که مأمور باید به اندازه کافی به کنترل نزدیک شود و همچنین، امکان فرمان دادن از راه دور وجود ندارد. زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته اجازه می‌دهد که قرائت و کنترل از فاصله دور، با هزینه کمتر و با فواصل زمانی بسیار کوتاه‌تری انجام شود. جمع‌آوری داده در سیستم قدرت مجهز به زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته، بدون مراجعه فیزیکی به محل کنترل و معمولاً از طریق شبکه ثابت انجام می‌شود.

سؤال‌ی که ممکن است مطرح شود این است که بر اساس آنچه ذکر شد، مشترک همواره باید روی یک نمایشگر خانگی میزان مصرف خود را بررسی و برای نحوه مصرف خود تصمیم‌گیری کند. اما اگر این امکان (مشاهده لحظه به لحظه نمایشگر) برای او فراهم نباشد، که در بیشتر موارد نیست، چه می‌توان کرد؟ پاسخ این است که بر اساس برنامه‌ریزیهای انجام شده می‌توان با ایجاد امکانات

1. Automated Meter Reading
2. Home Display

مخابراتی، اطلاعات را از اندازه‌گیر هوشمند به یک وسیله همراه مخابراتی مانند دستگاه تلفن همراه منتقل کرد و مشترک برحسب اطلاعات دریافتی کنترل لازم را روی تجهیزات هوشمند که باید به درگاه مخابراتی مجهز شوند، اعمال کند؛ یا حتی در مواردی بدون نیاز به فرمان از راه دور، با قرار دادن حد مصرف یا هزینه برای برخی دستگاههای پرمصرف، به‌صورت خودکار، این دستگاهها اقدامات لازم را انجام دهند. راهکاری که امروزه در خانه‌های هوشمند مطرح می‌شود، نصب و راه‌اندازی دستگاههای مدیریت مصرف انرژی در کنار سامانه اندازه‌گیری هوشمند است که قابلیت‌های گسترده‌ای همچون کنترل وسایل خانگی با توجه به اطلاعات ورودی از قبیل قیمت برق و میزان مصرف این وسایل را داشته باشد [۲۲].

۳.۳. برنامه‌های پاسخگویی بار

در یک تعریف کلی، پاسخگویی بار عبارت از مشارکت مصرف‌کننده‌های نهایی در بازارهای برق است که در پاسخ به تغییر زمانی قیمت‌ها انجام می‌شود. بازار هر کالایی (مانند طلا، نفت، برق و ...) از دو قسمت فروشنده‌ها یا تولیدکننده‌ها و خریداران یا مصرف‌کنندگان آن کالا تشکیل می‌شود. به دلایل مختلف، هم اکنون تعداد بسیار کمی از مصرف‌کنندگان برق قیمتی را برای برق پرداخت می‌کنند که بازتابی از هزینه‌های بازار است و در نتیجه، هیچ انگیزه و محرکی برای پاسخ به شرایط بازار برق ندارند که این امر به خسارت همه اعضای بازار منجر می‌شود. به صورت دقیق‌تر، پاسخگویی بار را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

تغییر مصرف برق مصرف‌کننده‌های نهایی از میزان الگوی مصرف معمول آنها که در پاسخ به یکی از این شرایط انجام می‌شود: ۱. تغییر قیمت برق در زمانهای مختلف؛ ۲. مشوقهایی که با ایجاد انگیزه برای مصرف کمتر برق در زمانهای قیمت بالای بازار برق انجام می‌گیرد؛ ۳. به خطر افتادن قابلیت اطمینان سیستم.

پاسخگویی بار در واقع، نشان دهنده خروجی عملی است که یک مصرف‌کننده برق در پاسخ به مشوقه‌ها انجام می‌دهد و عموماً شامل تغییر رفتارها و الگوی مصرف است. با وجود این، ارزش آن برای جامعه ناشی از تأثیر یکجای آن بر کل سیستم قدرت است. در نتیجه، فهم هر یک از این دو منظر (مصرف‌کننده و کل سیستم) و وفق دادن آنها، کلید اصلی توصیف و ارزشگذاری پاسخگویی بار و تشخیص محدودیتهای آن است [۲۳].

۳.۱.۳. اهمیت پاسخگویی بار

پاسخگویی بار دارای مزایای متنوع فنی و مالی برای مصرف‌کننده‌های برق، شرکت‌های تأمین‌کننده برق (شرکت‌های برق منطقه‌ای یا شرکت‌های توزیع) و بهره‌بردارهای شبکه است. سیستم‌های قدرت الکتریکی دارای مشخصه‌های خاصی هستند. به دلیل خواص فیزیکی و طبیعت انرژی الکتریکی نمی‌توان به نحوی اقتصادی و در مقیاس بزرگ آن را ذخیره کرد، لذا، تعادل بین تولید و مصرف باید به‌صورت لحظه‌ای برقرار باشد. از طرف دیگر، شرایط شبکه ممکن است به‌صورت روزانه، ساعتی و حتی به‌صورت لحظه‌ای دچار تغییرات عمده‌ای شود. بار سیستم نیز چنین شرایطی را دارد و ممکن است به سرعت و به‌صورت غیر قابل پیش‌بینی تغییر و عدم تعادل بین تولید و مصرف ناشی از آن، یکپارچگی و امنیت ناحیه وسیعی از شبکه را طی چند ثانیه تهدید کند. این خواص انرژی الکتریکی باعث می‌شود که هزینه حاشیه‌ای تأمین برق بسیار متغیر باشد و در زمانهای بسیار کوچک (هر ۱۵ دقیقه یا یک ساعت) تغییر کند. این در حالی است که بیشتر مصرف‌کننده‌ها قیمت ثابتی را برای برق پرداخت می‌کنند که برابر هزینه متوسط تولید برق است.

ناهماهنگی بین هزینه‌های کوتاه‌مدت تولید برق و نرخهای پرداختی مصرف‌کننده‌ها موجب استفاده نامناسب از منابع می‌شود، زیرا مصرف‌کننده‌ها هزینه کوتاه‌مدت و لحظه‌ای تولید برق را پرداخت نمی‌کنند و در نتیجه، هیچ محرک و انگیزه‌ای برای تنظیم مصرف خودشان با توجه به شرایط سیستم تولید ندارند. قیمت‌های ثابت برق مصرف‌کننده‌ها را به مصرف بیشتر در ساعاتی تشویق می‌کند که قیمت‌های برق بیشتر از نرخهای متوسط است. در مقابل، مصرف‌کننده‌ها تشویق می‌شوند در ساعاتی که هزینه تولید برق از نرخهای متوسط کمتر است، برق کمتری مصرف کنند. نتیجه آن شرایط این است که ممکن است هزینه‌های تولید برق بیشتر از آنچه باشد که از طرق دیگر حاصل می‌شود، زیرا لازم است گاهی ژنراتورهای پرهزینه را برای تأمین تقاضای مصرف‌کنندگانی که پاسخی به تغییر قیمت‌ها ندارند، راه‌اندازی کرد. همچنین، پاسخگو نبودن مصرف‌کنندگان فرصت و امکان افزایش قیمت‌ها از میزان قیمت‌های رقابتی را به واحدهای تولید می‌دهد و نوعی از "قدرت بازار" را برای آنها ایجاد می‌کند.

تأثیر پاسخگو نبودن بار کافی در سیستم، در بلندمدت، ممکن است بیشتر باشد، زیرا بالا بودن پیک بار پیش‌بینی شده و پاسخگو نبودن مصرف‌کنندگان می‌تواند موجب سرمایه‌گذاری برای ساختن واحدهای تولیدی جدید شود. این در حالی است که سیستم‌های قدرت الکتریکی بسیار هزینه‌بر هستند و احداث واحدهای تولید با طول عمر اقتصادی پیش‌بینی شده فقط چند دهه و گاهی چندین سال به طول می‌انجامد. بنابراین، یکی از مهم‌ترین مزایای پاسخگویی بار جلوگیری از سرمایه‌گذاری

برای واحدهای تولیدی جدیدی است که فقط برای تأمین بار در چند ساعت در یک سال مورد نیاز هستند.

پاسخگویی بار همچنین، می‌تواند موجب بهبود امنیت سیستم شود. در مواقع اضطراری سیستم یا هنگامی که حاشیه‌های رزرو در سیستم کم است، ممکن است لازم شود که شرکت برق برای حفظ یکپارچگی سیستم یا جلوگیری از خروجهای متوالی، قسمتی از بار مصرف کنندگان را قطع کند. انتخاب آزادانه قطع بار مصرف‌کنندگانی که برای قطع بارشان قیمت کمتری داده‌اند و داوطلبانه شرکت در یک برنامه پاسخگویی بار اضطراری را انتخاب کرده‌اند، ارزان‌تر و کارآمدتر از قطع بار به‌صورت تصادفی است.

۳.۲. انواع پاسخگویی بار

پاسخگویی بار را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد: پاسخگویی بار بر مبنای قیمت و پاسخگویی بار بر مبنای تشویق. تعرفه‌های متغیر با زمان خرده‌فروشی برق را، که شامل نرخهای زمان استفاده (TOU)، زمان حقیقی (RTP) و قیمتگذاری پیک بحرانی (CPP) هستند، می‌توان با نام "پاسخگویی بار بر مبنای قیمت" مشخص کرد. در این نوع تعرفه‌ها قیمت برق با توجه به تغییر هزینه‌های مربوط به تولید برق نوسان می‌کند. تعرفه‌های متغیر با زمان می‌توانند به‌عنوان جایگزینی اختیاری برای نرخ معمول ثابت برق پیشنهاد یا اینکه خود به‌عنوان نرخ برق پایه برای همه مصرف‌کنندگان استفاده شوند. مصرف‌کنندگانی که از این نوع نرخها استفاده می‌کنند، می‌توانند با کاهش مصرف در ساعت‌های زیادی قیمت یا تغییر زمان مصرف به زمانهای کمی قیمت، از مزایای این نوع نرخها بهره ببرند و صورت‌حساب برق مصرفی‌شان را کاهش دهند. پاسخگویی مصرف‌کنندگان به این تعرفه‌ها کاملاً اختیاری است و به تصمیمات اقتصادی آنها بستگی دارد.

دسته دوم پاسخگویی بار "برنامه‌های پاسخگویی بار بر مبنای تشویق" هستند که عبارت‌اند از: موافقتنامه‌های قراردادی که قانونگذاران، بهره‌بردارهای شبکه یا شرکتهای تأمین‌کننده برق (شرکتهای برق منطقه‌ای و شرکتهای توزیع) طراحی و برای تشویق کاهش بار در زمانهای بحرانی به مصرف‌کنندگان پیشنهاد می‌کنند. در این برنامه‌ها به مصرف‌کنندگان مشارکت‌کننده مشوقهایی در ازای کاهش بار پرداخت می‌شود که جدا از نرخ خرده‌فروشی برق و ممکن است ثابت یا متغیر با زمان باشد. مشوقه‌ها ممکن است به‌صورت صریح در صورت‌حساب مصرف‌کننده وارد یا اینکه به‌صورت

-
1. Cascading Outages
 2. Price-based Demand Response
 3. Incentive-based Demand Response Programs

جداگانه پرداخت شود. مشارکت مصرف‌کننده‌ها در این برنامه‌ها و پاسخگویی آنها به شرایط برنامه اختیاری است، هرچند در برخی از این برنامه‌ها جریمه‌هایی نیز بابت پاسخ ندادن در مواقع نیاز برنامه به مصرف‌کننده‌ها تعلق می‌گیرد. این نوع از پاسخگویی بار از یک سری محرک یا مشوق برای جلب مشارکت مصرف‌کننده تشکیل شده است. به دلیل اینکه این برنامه‌ها بر مبنای پاسخگویی مستقیم مصرف‌کننده بر قیمت‌ها نیستند، که اندازه‌گیری و پیش‌بینی آنها مشکل است، لذا، این برنامه‌ها ابزاری بسیار مؤثر را برای مدیریت هزینه‌ها و حفظ قابلیت اطمینان سیستم در اختیار شرکتهای تأمین‌کننده برق و بهره‌بردارهای سیستم قرار می‌دهد.

برنامه‌های پاسخگویی بار بر مبنای تشویق را می‌توان بدین گونه طبقه‌بندی کرد: کنترل مستقیم بار، سرویسهای قابل قطع/قابل کاهش، برنامه‌های پاسخگویی بار اضطراری، برنامه‌های بازار ظرفیت، برنامه‌های قیمت دهی/بازخرید تقاضا و برنامه‌های بازارهای خدمات جانبی. تفاوت این برنامه‌ها در نوع توافقی است که با مصرف‌کننده صورت می‌گیرد [۲۳].

۴.۳. خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال به شبکه

نگرانیهایی بسیار زیادی در خصوص امنیت انرژی و وابستگی به نفت وجود دارد. مصرف انرژی در دنیا روز به روز در حال افزایش است، در حالی که منابع کنونی تأمین انرژی محدود هستند. تمام این عوامل تأیید کننده این واقعیت هستند که باید به‌منظور کاهش وابستگی به انرژی تولیدی از نفت و مشتقات آن و همچنین، کاهش آلودگی ناشی از گازهای گلخانه‌ای راهکارهای جدید ایجاد کرد. میزان تأثیر گازهای تولیدی ناشی از مصرف منابع سوخت فسیلی به‌صورت کاملاً محسوسی سبب تغییر وضعیت آب و هوایی شده است [۲۴ و ۲۵]. کشور آمریکا کاهش ۱۷ درصدی تولید این گازها را تا سال ۲۰۲۰ در دستور کار خویش قرار داده است. ۱۸۸ کشور پیمان کیوتو را امضا کرده‌اند و قوانین بسیار زیادی به‌منظور ممانعت از تولید گازهای گلخانه‌ای در سطح صنایع گوناگون اجرا شده است.

به‌منظور دستیابی به تعهدات تصویب شده در این پیمانهای بین‌المللی نیاز است که استفاده از انرژیهای تولیدی از سوخته‌های فسیلی کاهش یابد. مطابق با آمارهای ارائه شده [۲۶]، تولید گازهای گلخانه‌ای به‌وسیله سیستم حمل و نقل دومین منبع انتشار این گازها در ایالات متحده امریکاست. بنابراین، الکتریکی کردن خودروها می‌تواند کمک بسیار شایانی به کاهش آلودگی در سطح دنیا بکند [۲۷]. تا به حال انرژی مورد نیاز سیستم حمل و نقل از منابع نفتی تأمین می‌شود، اما با الکتریکی

کردن خودروها امکان تولید انرژی مورد نیاز خودروها از تمام منابع انرژی الکتریکی فراهم می‌شود. لذا، می‌توان استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر را به‌منظور تأمین انرژی الکتریکی به‌کار گرفت. استفاده از خودروهای قابل اتصال به شبکه مانند EV^۲ و PHEVها می‌تواند فواید بسیاری را در بحث آثار محیط زیستی به همراه داشته باشد. به‌صورت کلی، بر طبق دیدگاه "از چاه تا چرخ" خودروهای قابل اتصال به شبکه میزان مصرف انرژی را در بخش حمل و نقل کاهش خواهند داد. بررسیهای گوناگونی نشان می‌دهد که استفاده از PHEVها تا ۳۲٪ میزان آلودگی گازهای گلخانه‌ای را در مقایسه با خودروهای سنتی کاهش خواهند داد [۲۸]. حتی با استفاده از نیروگاههای فسیلی به‌منظور تولید انرژی الکتریکی، PHEVها باز هم می‌توانند آلودگی کمتری در قیاس با خودروهای سنتی تولید کنند.

به‌منظور دستیابی به پتانسیل‌های گوناگون PHEVها باید چالشهای بسیار زیادی شامل دسترسی به شارژ، بازه هزینه‌های خودروها، ناآگاهی مشتریان در خصوص فواید این خودروها و تأثیرات آنها بر شبکه‌های برق را تجزیه و تحلیل کرد [۲۹]. مسئله هزینه همیشه یکی از اساسی‌ترین چالشها بر سر راه موفقیت یک فناوری است. مشتریان هنگام خرید بیشتر به هزینه‌های اولیه کالا توجه دارند تا هزینه‌های کل آن. جدا از قیمت خرید خودرو و میزان مصرف خودرو در هر مایل، تعدادی از مشتریان به عواملی مانند تخفیف، مشوقها و هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیرات در مقایسه با سایر خودروها دقت می‌کنند. دولتهای مختلف بر هزینه‌های اولیه PHEVها یارانه اعمال می‌کنند تا بتوانند مردم را با سرعت بیشتری به استفاده از این خودروها ترغیب کنند. برای مثال، در ایالات متحده امریکا ۲۵۰۰ تا ۷۵۰۰ دلار، بسته به ظرفیت باتری خودرو، یارانه به PHEVها تعلق می‌گیرد. این یارانه به ۲۰۰۰۰ خودرویی که برای اولین بار یک سازنده می‌سازد، تعلق می‌گیرد [۲۹]. در بحث هزینه‌های بهره‌برداری خودروهای الکتریکی در مقایسه با خودروهای بنزینی تفاوت‌های زیادی وجود دارد. استفاده از انرژی الکتریکی به‌منظور بهره‌برداری از PHEVها بسیار ارزان‌تر از خودروهای بنزینی است. علاوه بر این، با توجه به توانایی PHEVها در فروش توان به شبکه (V2G)^۵، می‌توان نتیجه گرفت که از نظر هزینه‌های بهره‌برداری، خودروهای الکتریکی قابل اتصال به شبکه بیشتر مورد استقبال مشتریان قرار خواهند گرفت. همچنین، باید در نظر داشت که در مقایسه خودروهای الکتریکی و بنزین سوز یک سری

-
1. Grid-Enabled Vehicles (GEVs)
 2. Electric Vehicle
 3. Charging Access
 4. Rebate
 5. Vehicle 2 Grid

هزینه‌های مخفی نیز وجود دارد. امروزه، در محاسبه هزینه‌های بنزین خودروها، هزینه‌های مربوط به آلودگی محیط زیست لحاظ نمی‌شود، در صورتی که این هزینه‌ها به دولتها تحمیل خواهد شد. لذا، اگر این هزینه‌ها نیز در تعیین قیمت سوخته‌های فسیلی لحاظ شود، برتری خودروهای الکتریکی بیش از پیش نمایان خواهد شد.

چالش دیگری که مقبولیت خودروهای الکتریکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بود یا نبود ایستگاههای شارژ برای آنهاست. تا به امروز صاحبان خودروهای بنزینی دغدغه‌ای در زمینه تأمین سوخت خودرو خویش احساس نمی‌کرده‌اند، چرا که پمپ بنزینها به تعداد کافی وجود داشته است. اما بحث ایستگاههای شارژ خودروهای هیبریدی یک چالش بزرگ به‌شمار می‌رود که هنوز حل نشده است. اگر چه با ظهور فناوری PHEV توانایی شارژ خودرو از طریق شبکه برق فراهم شده است و پریزهای برق در مکانهای مختلف به وفور یافت می‌شود، اما شارژ خودروها در سطح ولتاژ پایین نیازمند متصل بودن خودرو به شبکه برای مدت زیادی است که این در عمل برای رانندگان این خودروها ناممکن است.

یکی از مسائل اساسی خودروهای الکتریکی در خصوص انرژی اولیه مورد نیاز آنها تأثیرات این خودروها بر شبکه‌های برق است. اگر چه ظرفیت بسیار بالایی در بخش تولید سیستم‌های قدرت وجود دارد تا بتواند نیازهای PHEVها را پوشش دهد، اما شارژ تعداد زیادی از خودروها در زمانهای اوج مصرف برق به‌صورت همزمان می‌تواند تهدیدی برای تأمین انرژی الکتریکی در آن ساعات به‌شمار رود و شاخصهای سیستمی شبکه برق را (مانند میزان تلفات شبکه) تحت تأثیر قرار دهد. اما باید توجه داشت که پیش‌بینی می‌شود پذیرش PHEVها به تدریج صورت پذیرد. لذا، شرکتهای برق فرصت کافی برای به روز کردن شبکه‌های خویش را خواهند داشت. این امر را بسیاری از کارشناسان مانند پذیرش سایر بارهای الکتریکی مانند یخچالها، سیستم‌های تهویه و غیره می‌دانند. از طرف دیگر، بیان می‌شود که افزایش نفوذ PHEVها به‌صورت توده‌ای انجام می‌گیرد. این بدین معناست که پذیرش این خودروها با توجه به سطح اجتماعی افراد صورت می‌پذیرد. مطالعات EPRI نشان می‌دهد که تأثیرات PHEVها بر روی شبکه‌های توزیع به‌صورت محلی است [۳۰]. اما به هر صورت،

-
1. Hidden Costs
 2. Low Voltage
 3. Lumpy
 4. Electric Power Research Institute

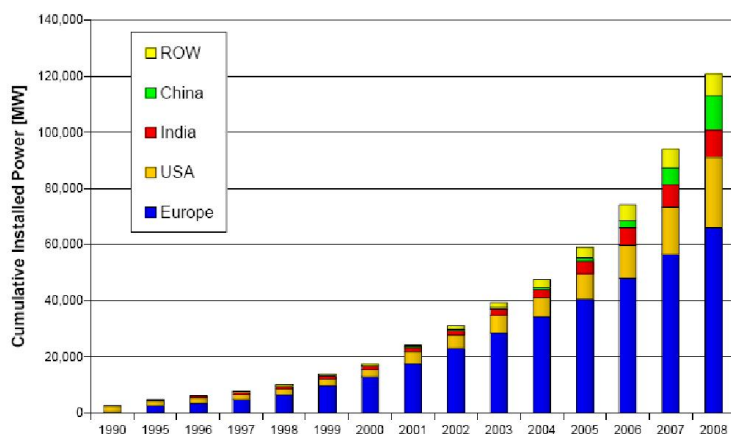
بررسی جامع در خصوص ورود این بار جدید به سیستم‌های قدرت می‌تواند راهکارهای مقابله با مضرات آنها را قبل از رخداد در اختیار بهره‌برداران شبکه‌های برق قرار دهد. برای ارزیابی تأثیر PHEV بر شبکه توزیع تعیین مشخصات PHEV‌ها حایز اهمیت است. این مشخصات شامل سایز باتری، انرژی مورد نیاز برای شارژ باتری، مسافت طی شده با خودرو و زمان شروع شارژ باتری است [۳۱]. سایز باتری PHEV به کلاس خودرو و میزان مسافتی که خودرو در حالت الکتریکی می‌تواند طی کند [محدوده تمام الکتریک AER]، بستگی دارد. انرژی مورد نیاز برای شارژ خودرو به انرژی مصرفی خودرو در طول روز وابسته است. انرژی مصرفی خودرو با توجه به میزان مسافتی که خودرو در طول روز طی کرده است، به دست می‌آید. همان‌طور که دیده می‌شود، مشخصات PHEV را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: دسته اول مشخصاتی که به ویژگیهای خودرو و کارخانه سازنده آن بستگی دارد، همچون کلاس خودرو، دسته دوم مشخصاتی که به رفتار مردم و الگوی رانندگی آنها وابسته است، مانند مسافتی که در طول روز طی می‌کنند و زمان شروع شارژ PHEV. بنابراین، بررسی رفتار مصرف کنندگان نکته مهمی در ارزیابی تأثیر PHEV بر شبکه توزیع و تخمین بار ناشی از شارژ آنهاست.

شارژ بدون کنترل PHEV‌ها موجب افزایش قابل توجه بیشینه بار و همچنین، افزایش تلفات شبکه می‌شود. بنابراین، کنترل شارژ آنها برای بهبود قابلیت اطمینان شبکه و استفاده بهتر از امکانات موجود امری ضروری به نظر می‌رسد. در سالهای اخیر مطالعات گوناگونی در زمینه کنترل شارژ PHEV صورت گرفته است. کنترل شارژ به معنای تعیین بازه‌های شارژ و همچنین، سطح شارژ خودروهاست. هدف از کنترل شارژ کاهش آسیب‌های احتمالی ناشی از شارژ گسترده خودروهای الکتریکی است. کنترل شارژ هم در خانه و هم در مکان عمومی همچون پارکینگ میسر است. کنترل شارژ به وسیله یک بهینه سازی با توابع هدف گوناگون و محدودیتهایی که تضمین کننده آسایش صاحب خودرو باشد، قابل پیاده سازی است. انتظار آن است که نتایج حاصل از کنترل شارژ موجب پیشگیری از مضرات احتمالی استفاده گسترده از خودروهای الکتریکی شود.

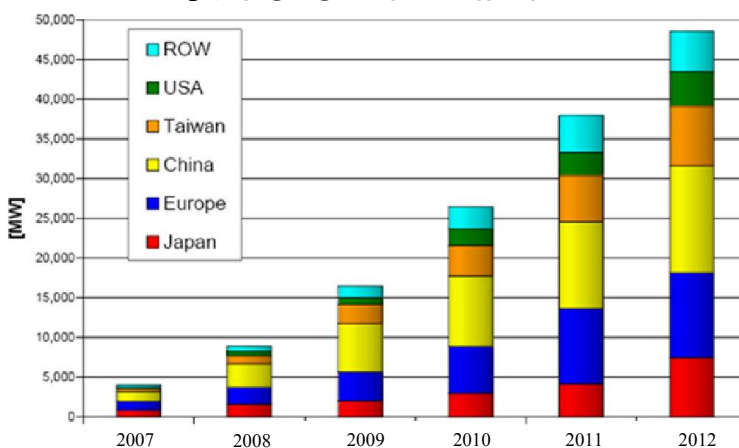
۳.۵. تولیدات پراکنده تجدیدپذیر

افزایش تدریجی قیمت سوخت‌های فسیلی، رو به پایان نهادن این منابع، مسائل زیست محیطی ناشی از مصرف این‌گونه سوختها و تولید گازهای گلخانه‌ای نظیر NO_2 , SO_2 و CO_2 که به تخریب لایه ازن منجر می‌شود، سبب رشد روزافزون استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند توربینهای بادی، توربینهای آبی و سیستم‌های فتوولتائیک شده است. این امر با پیشرفت فناوری ساخت سیستم‌های

فتوولتاییک و توربینهای بادی و کاهش قیمت تمام شده برق تولیدی آنها سرعت گرفته است. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به منظور تولید برق در کشورهای مختلف دنیا روز به روز در حال افزایش است. در شکل‌های ۵ و ۶ روند افزایش نصب واحدهای بادی و فتوولتاییک نشان داده شده است [۳۲].



شکل ۵: روند نصب واحدهای بادی در جهان



شکل ۶: روند نصب واحدهای فتوولتاییک در جهان

با زیاد شدن سهم انرژیهای نو در تأمین بار، بررسی تأثیر آنها بر مسائل مختلف موجود در سیستم قدرت نظیر بهره‌برداری، کیفیت توان و قابلیت اطمینان اهمیت پیدا کرده است. انرژی آبی، بادی و خورشیدی پتانسیل فوق‌العاده‌ای ارائه می‌دهند، اما بر خلاف سوخت‌هایی مانند ذغال سنگ، منبع انرژی اغلب دور از محل تقاضای انرژی است. بنابراین، بهره‌گیری از این نوع انرژیها مستلزم سیستم انتقال پیشرفته و انعطاف‌پذیر است.

مروری بر مقالات پژوهشی منتشر شده در این زمینه نشان می‌دهد که بحث استفاده از تولیدات پراکنده پیش از مباحث مربوط به هوشمندسازی شبکه مطرح بوده است. اما همان‌گونه که در انتظارات حاصل از هوشمندسازی اشاره شد، پذیرش مولدهای پراکنده، به‌خصوص مولدهای تجدیدپذیر، از اهداف شبکه هوشمند است. بدین معنا که مرتفع ساختن چالشهای پیش‌روی حضور تولیدات پراکنده در شبکه توزیع از اهدافی است که هوشمندسازی شبکه دنبال می‌کند. رفع این چالشها امکان گسترش استفاده از منابع تولید پراکنده به خصوص منابع تجدیدپذیر انرژی را نیز فراهم می‌کند. یکی از موانع فنی اولیه ضعف استانداردهای رسمی از قبیل استانداردهایی برای بررسی شبکه در جزیره‌سازی منابع تولید پراکنده و ریزشبکه‌ها در سطح توزیع است. کاهش قیمت تمام شده مولدهای پراکنده، طراحی زیرساختهای ارتباطی مناسب برای ارتباط این مولدها با هم و با شبکه، مشارکت‌دهی و خرید برق از این مولدها با در نظر گرفتن سیاستهای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری شبکه و بهره‌برداری از این مولدها با وجود نوسانات توان خروجی از مسائل پیش‌روی شبکه هوشمند به‌منظور افزایش میزان نفوذ منابع تولید پراکنده در سیستم قدرت است. گسترش استفاده از منابع تولید پاک و انرژیهای تجدیدپذیر نه تنها می‌تواند مصرف‌کننده‌ها را از حالت منفعل به حالت پویا تبدیل کند، بلکه موجب کاهش آلودگی ناشی از واحدهای سنتی و کاهش گازهای گلخانه‌ای نیز می‌شود [۵].

۴. سیستم‌های مخابراتی و امنیت اطلاعات در شبکه‌های هوشمند

صنعت برق در حال تجمیع سیستم انتقال برق و اطلاعات با شبکه‌های مخابراتی به‌منظور تشکیل یک زیرساخت دو سویه از برق و اطلاعات است که این ساختار پیش‌نیاز هوشمندسازی شبکه است. در این شبکه سیستم‌های کنترل شبکه قدرت رابطه تنگاتنگی با سیستم‌های انتقال داده خواهند داشت. همچنین، به‌دلیل استفاده از سیستم‌ها و فناوریهای جدید مخابراتی، ساختار شبکه‌های هوشمند بسیار کارآمد و بهینه از نظر هزینه و مدیریت خواهند بود. با این حال، تجمیع این دو ساختار در حالی که فواید فراوانی دارد، دارای معایبی در زمینه امنیت سیستم و حفاظت است.

سیستم مخابرات شبکه‌های هوشمند دارای یک ساختار لایه‌ای است و وظیفه جمع‌آوری اطلاعات و کنترل برق‌رسانی را بر عهده دارد. یک سیستم مخابراتی در یک شبکه هوشمند نتیجه تجمیع چندین مرکز کنترل است که هر یک از مراکز کنترل وظیفه رسیدگی و نظارت بر چندین مرکز تولید برق و ایستگاه فرعی را برعهده دارند. یک مرکز کنترل وظایف مدیریت داده‌های عملیاتی، کنترل دستورهای بازار برق و عملیات سیستم قدرت و کنترل جمع‌آوری داده را بر عهده دارد. مراکز فرعی

شامل قطع‌کننده مدار^۱، واحدهای کنترل از راه دور، واسط مشترک انسان و ماشین، ادوات مخابراتی (سوئیچها، هابها و مسیریابها)، سرورهای لوگ، متمرکز کننده داده و یک پروتکل است. در ادامه پس از اشاره‌ای کوتاه به اهمیت شبکه‌های مخابراتی در مسیر هوشمندسازی شبکه قدرت و معرفی شبکه‌های مخابراتی موجود، چالشهای امنیتی پیش روی نظام نوین صنعت برق بیان شده است.

۱.۴. نقش مخابرات در توسعه شبکه‌های هوشمند

در این بخش به اختصار نقش مخابرات در توسعه شبکه‌های هوشمند بیان شده است [۳۳].

- تولید متمرکز برق
- کنترل و مدیریت عملکرد نیروگاهها در سطح منطقه‌ای و ملی به وجود زیرساخت مخابراتی برای تبادل اطلاعات و جابه‌جایی داده‌های مورد نظر نیاز دارد. عملکرد مطمئن و مناسب تولید در گرو وجود اطلاعات مورد نظر با قابلیت اعتماد و اطمینان مورد نیاز در مراکز کنترل و مدیریت شبکه‌های قدرت است. امکان ارتباط صوتی، ثبت و انتقال اطلاعات مختلف مانند ولتاژ، جریان و فرکانس از مواردی است که برای این منظور لازم است.
- انتقال و توزیع انرژی برق
- برنامه‌ریزی و توسعه شبکه برق مستلزم دسترسی به اطلاعات حیاتی شبکه تولید، انتقال، توزیع و مصرف است. این اطلاعات نقش مهمی در برنامه‌ریزی صحیح، تشخیص گلوگاهها، حفاظت از شبکه، پیش‌بینی و انجام دادن اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی برای جلوگیری از بروز خاموشیهای سراسری در شبکه برق ایفا می‌کنند. شبکه‌های مخابراتی در صنعت برق زیرساخت لازم برای جمع‌آوری و تحلیل این اطلاعات را فراهم می‌کنند. باید فرمانهای لازم کنترلی با تأخیری بسیار اندک و به‌صورتی قابل اعتماد میان پستهای برق مرتبط جابه‌جا شود و این امر مستلزم زمینه قابل اعتماد مخابراتی میان این دو است.
- بازار برق
- شبکه مخابراتی صنعت برق باید امکان خرید و فروش و جابه‌جایی برق را به‌منظور شکل‌گیری انواع معاملات برق به‌عنوان یک کالا در سطوح مختلف ولتاژ و برای کلیه خریداران و فروشندگان خصوصی و دولتی برق در بازارهای مختلف برق و بورس برق تأمین کند.
- تولید پراکنده برق

کنترل تولید و توزیع انرژی برای مراکز و منابع متعدد تولید و مصرف باید به خوبی انجام پذیرد و این امر مستلزم تبادل اطلاعات کنترلی و مدیریتی برای تعداد نقاط زیادی در شبکه و ایجاد هماهنگیهای لازم در این خصوص است.

• تعامل با مشترکان

امور متعددی مانند بررسی و ثبت مصرف انرژی مشترکان، گزارش خرابیها، پاسخگویی به نیازمندیهای مشترکان و مانند آن همگی بر زمینه‌های مخابراتی برای تبادل اطلاعات متکی است.

• ارتباطات درون سازمانی صنعت برق

کاربریهای نوینی مانند ایجاد امکانات ارتباط ویدئو کنفرانس، ایجاد مرکز داده صنعت برق کشور، راهاندازی اینترنت اختصاصی صنعت برق، راهاندازی اطلاعات اختصاصی صنعت برق، آموزش از راه دور و نظارت صوتی - تصویری از راه دور بر اماکن مهم و حیاتی از جمله موارد دیگری هستند که لزوم گسترش زیرساختهای مخابراتی با توانمندی حمل اطلاعات، صدا و تصویر با پهنای باند مناسب را به خوبی نشان می‌دهند.

در ادامه به اختصار انواع شبکه‌های مخابراتی و چالش امنیت اطلاعات در شبکه‌های هوشمند بیان شده است.

۲.۴. شبکه‌های مخابرات و امنیت اطلاعات در شبکه‌های هوشمند

تقاضاهای کاربردی و تجاری سیستم‌های برقی نیازمند یک شبکه مخابرات با کارایی بالاست. معماری چنین شبکه‌ای از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به اندازه و ساختار شبکه‌های هوشمند، فناوریهای مخابراتی مختلف استفاده می‌شود. برخی از این فناوریها امروزه نیز استفاده می‌شوند و برخی دیگر در حال بررسی برای کاربرد در آینده هستند. این فناوریها را می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد: (۱) مخابرات از طریق خطوط قدرت؛ (۲) مخابرات ماهواره‌ای؛ (۳) مخابرات بی‌سیم؛ (۴) مخابرات از طریق فیبر نوری.

قابلیت اطمینان شبکه‌های هوشمند وابسته به قابلیت اطمینان سیستم‌های مخابرات و کنترل دخیل در سیستم هوشمند نیز است. با توجه به گسترش شبکه‌های هوشمند، شبکه‌های مخابراتی روز به روز گسترش می‌یابند و پیشرفته می‌شوند و در عین حال، نیازمند کنترل بهتر و قابلیت اطمینان بالاتری هستند. شبکه هوشمند به اتصالات متعددی میان اجزا نیازمند است تا بتواند اهداف مورد انتظار را برآورده سازد. با وجود اتصالات متعدد، به پروتکل‌های پیشرفته سایبری برای مقابله با آسیبها

و تهدیدها نیاز است. معماری و ساختار امنیت سایبری برای مخابرات شبکه هوشمند بر اساس نیازها و ملزومات امنیت سایبری و استانداردهای صنعتی ارائه شده است. در ادامه چالشها و راه‌حلهای پیش رو در امنیت اطلاعات سیستم‌های مخابراتی شبکه هوشمند برق از قبیل ارتباطات بین شبکه‌ای، رویکردهای امنیتی و بهره‌وری و قابلیت گسترش این سیستم‌ها بررسی شده است [۳۳]. در انتها نیز تفاوت رویکرد امنیتی در شبکه‌های هوشمند برق و یک شبکه سازمانی بیان شده است که تبیین کننده برخی نکات امنیتی در شبکه هوشمند است.

۴.۲.۱. ارتباطات بین شبکه‌ای

شبکه برقی که دارای یک ارتباطات حداقلی با اینترنت باشد، در معرض بسیاری از خطرهای قرار دارد. این خطرهای شامل حملات امنیتی از سوی گروههای دشمن و هکرها به منظور ایجاد وقفه در تولید، انتقال و توزیع برق است. لایه‌های مختلف امنیت سایبری باید به نحوی طراحی شود که تهدیدهای ناشی از حملات را به حداقل برساند.

تمام اتصالات یک شبکه به اینترنتی نیاز دارد که بسیار امن باشد. تشخیص نفوذ مهاجم لزوماً در درگاه اتصال شبکه به اینترنت لازم نیست، بلکه در داخل شبکه و به خصوص در محیط انتقال داده به صورت بی‌سیم نیاز است که این سیستم بتواند نفوذ را تشخیص دهد.

تمام اجزا، سیستم‌ها و شبکه‌هایی که در یک شبکه هوشمند برق هستند، باید هنگام طراحی امنیتی در نظر گرفته شوند. در عین حال، در صورت بروز یک حادثه باید سیستم در اسرع وقت بتواند پاسخ مناسب بدهد. در این حالت اگر یک سیستم خصوصی باشد، از این نظر که تعداد شرکتهای دخیل در سیستم کم هستند، پاسخ بهتر و سریع‌تری به حادثه می‌دهد. سرعت در پاسخگویی در مواقعی که سیستم دچار یک خاموشی می‌شود، از اهمیت زیادی برخوردار است.

۴.۲.۲. رویکردهای امنیتی

قابلیت اطمینان شبکه هوشمند برق به عملکرد صحیح اجزا و ارتباط مناسب این اجزا بستگی دارد. برای مختل کردن یک شبکه هوشمند برق یک مهاجم ممکن است تلاش کند که کنترل یک جزء سیستم را به دست آورد و خود را به عنوان جعلی به سیستم معرفی یا اینکه یک اخطار اشتباه ارسال کند. یکی از این نمونه حملات، حمله‌ای است که از دسترسی افراد مجاز به سیستم جلوگیری می‌شود. طراحان پروتکل‌های شبکه هوشمند برق باید این نوع حمله را مدنظر قرار دهند و راهکارهای مورد نظر را تبیین کنند. با توجه به اینکه شرکتهای و سازمانهای زیادی در شبکه هوشمند برق دخیل هستند و همچنین، به کارگیری سیستم‌های هوشمند توزیع شده در سیستم مخابراتی شبکه هوشمند

برق در حال گسترش است، نیاز است که در احراز هویت و تشخیص هویت افرادی که از راه دور درخواست دسترسی دارند، دقت لازم به عمل آید. چندین راه حل تکنیکی برای این موضوع بر اساس رویکردهای مختلف امنیتی پیشنهاد شده است که می توان راه حل های پیشنهادی SAML و WS-Trust را نام برد. در زمینه رویکردهای امنیتی باید این موضوع را مورد توجه قرار داد که در صورت امکان این رویکردها بین سازمانهای مختلف سازگار باشد.

۳.۲.۴. بهره‌وری و مقیاس‌پذیری

اطمینان از دسترس‌پذیری یک سیستم از مهم‌ترین اهداف بهره‌بردار سیستم است. بدین منظور باید چندین نکته را مد نظر قرار داد: اول اینکه سیستم باید در مصرف و استفاده از منابع محاسباتی و مخابراتی به صورت بهینه عمل کند، به نحوی که منابع هدر نرود و همه نیازها را پاسخ بدهد. دوم اینکه سیستم باید دارای یک سیستم قوی مدیریت خطا باشد که بتواند از پس تشخیص و رفع سریع مناسب خرابیها برآید. سوم اینکه سیستم باید دارای افزونگی کافی باشد که در صورت خراب شدن یا در معرض خطر بودن یک زیر سیستم، این قابلیت وجود داشته باشد که از کارافتادن کل سیستم جلوگیری شود. چهارم اینکه سیستم باید از عملکردهای امنیتی که در سیستم‌های مخابراتی موجود در شبکه هوشمند برق تعریف می‌شود، پشتیبانی کند.

۳.۴. تفاوت‌های امنیت در شبکه سازمانی و شبکه هوشمند برق

در طی دهه اخیر، صنعت فناوری اطلاعات شاهد پیشرفت گسترده‌ای در زمینه راه‌حل‌های امنیت اطلاعات در زمینه حفاظت از شبکه‌های سازمانی و کاهش آسیب‌پذیری این شبکه‌ها در مقابل امنیت سایبری بوده است. از دیوار آتشین تا سیستم‌های تشخیص نفوذ و شبکه‌های خصوصی مجاز^۵ همگی در زمینه امن کردن زیرساخت فناوری اطلاعات در سطح تجاری در شبکه‌های سازمانی مؤثر بوده است. با این حال، این راه‌حلها در زمینه امنیت سایبری در سطوح کنترل و اتوماسیون ناتوان هستند. سه تفاوت اصلی بین امنیت شبکه‌های سازمانی و شبکه‌های هوشمند برق در ادامه بیان شده است:

-
1. Security Assertion Markup Language
 2. Web Services Trust
 3. Firewall
 4. Intrusion Detection System
 5. Virtual Private Network

- اهداف متفاوت امنیتی: در شبکه‌های سازمانی هدف اصلی امنیت، حفاظت از داده است. در این خصوص سه موضوع مطرح است: درستی داده، محرمانگی داده و دسترس پذیری داده. منظور از درستی داده، حفاظت از داده در مقابل تغییرات افراد غیر مجاز است. محرمانگی داده؛ یعنی جلوگیری افراد غیر مجاز از دسترسی به داده است. دسترس پذیری داده نیز به معنای حصول اطمینان از این امر است که کسی نتواند دسترسی به داده را توسط افراد مجاز قطع کند. در شبکه‌های هوشمند برق اولویت اول حفاظت از انسان است. اولویت دوم حصول قابلیت اطمینان لازم است. برای مثال، یک حمله سایبری ممکن است موجب یک خاموشی بزرگ شود یا اینکه وضعیت سیستم را از حالت بهینه اقتصادی خارج کند. سومین اولویت حفاظت از سیستم‌ها و خطوط قدرت است.
- ساختارهای متفاوت امنیتی: در شبکه‌های سازمانی سرور داده معمولاً در مرکز شبکه قرار دارد و نسبت به گره‌های انتهایی نیاز بیشتری به حفاظت دارد. در صورتی که در شبکه‌های هوشمند قدرت، سامانه مدیریت انرژی در مرکز کنترل و RTU/PLCها در انتهای شبکه قرار دارند. معمولاً ادواتی مثل قطع کننده مدار^۱ و وصل کننده^۲ که مستقیماً به وسیله RTU/PLCها کنترل می‌شوند، می‌توانند به زندگی انسان، تجهیزات و خطوط قدرت آسیب بزنند. سیستم‌های مدیریت انرژی/اسکادا به‌طور مستقیم نمی‌توانند به سیستم آسیب بزنند. بنابراین، برخلاف شبکه‌های سازمانی، گره‌های انتهایی در شبکه‌های هوشمند قدرت به کنترل و حفاظت از طرف مرکز کنترل نیاز دارند.
- فناوری پایه متفاوت: در شبکه‌های سازمانی، Windows، Unix و Linux به‌صورت گسترده به عنوان سیستم عامل استفاده می‌شوند. همچنین، اینترنت برای اتصال دستگاهها بر اساس پروتکل‌های IP استفاده می‌شود. بنابراین، در این شبکه‌ها راه‌حلهای امنیتی بر اساس این زیرساختهای معمول پیاده می‌شود. با این حال، در شبکه‌های هوشمند برق علاوه بر سیستم‌های عامل بالا، از یک سری سیستم‌های عامل اختصاصی و پروتکل مخابراتی متفاوت از TCP/IP مثل IEC61850، DNP 3.9، ICCP استفاده می‌کنند. بدین ترتیب، موضوع چالش برانگیز این است که راه‌حلهایی را که بر اساس شبکه سازمانی پیاده‌سازی شده است، برای سیستم‌های شبکه هوشمند توسعه داده شود.

چالشهای اشاره شده در زمینه امنیت اطلاعات در شبکه هوشمند از مهم‌ترین مباحثی هستند که در مسیر هوشمندسازی شبکه قدرت باید مورد توجه جدی قرار گیرند.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

شبکه هوشمند نه تنها موجب بهبود بهره‌وری عرضه انرژی خواهد شد، بلکه امکان استفاده آسان از انواع انرژیها را نیز فراهم خواهد ساخت. در این میان، استفاده گسترده از منابع انرژی تجدیدپذیر در چرخه تولید انرژی الکتریکی اهمیت بسیاری دارد. علاوه بر این، شبکه هوشمند فناوریهای متنوعی به کار می‌گیرد و خدمات جدیدی برای تولید، انتقال و مصرف انرژی ارائه می‌دهد. در این میان، بازیگران جدیدی در بازار انرژی الکتریکی مطرح و موجب بهبود روند فعلی تبادل انرژی خواهند شد. از سوی دیگر، ظرفیت سیستم انتقال در سالهای پیش رو باید افزایش چشمگیری پیدا کند، چرا که میزان مصرف مشتریان افزایش خواهد یافت. برای مثال، سیستم گرمایش به‌وسیله پمپهای گرمایی به شدت در حال توسعه و استفاده از خودروهای الکتریکی روز به روز در حال افزایش است. بنابراین، سرمایه‌گذاران سیستم باید به فکر توسعه و ایجاد ظرفیتهای جدید برای شبکه انتقال باشند. گسترش و تقویت شبکه انتقال نیازمند داشتن شبکه‌ای هوشمند است. انتقال دوسویه اطلاعات از طریق سامانه اندازه‌گیری پیشرفته که امکان فعالسازی مصرف‌کنندگان و شرکت آنها در برنامه‌های گوناگون را فراهم می‌کند، از دیگر رویکردهای شبکه هوشمند است. با گسترش زیرساختهای اطلاعاتی و مخابراتی، حفظ امنیت سیستم در برابر حملات سایبری نیز اهمیت می‌یابد که باید مورد توجه بهره‌بردار شبکه هوشمند قرار بگیرد.

با توجه به توضیحات ارائه شده، پیاده‌سازی شبکه هوشمند امری اجتناب‌ناپذیر است که باید به‌وسیله طراحی نقشه راه مناسبی صورت گیرد. طراحی نقشه راه ابتدا به سیاستهای کلان و اسناد بالادستی صنعت برق و همچنین، نگاه ویژه مسئولان امر و دولتمردان وابسته است. ضروری است پس از تبیین سیاستها و همچنین، سطح هوشمندی مورد نظر باید با نگاه به مبانی هوشمندسازی ارائه شده در بخشهای پیشین به اجرای مرحله به مرحله آن اهتمام ورزید.

مراجع

1. Bouhafs, F., Mackay, M. and Merabti, M. (2012), Links to the future: Communication requirements and challenges in the smart grid, *Power and Energy Magazine, IEEE*, Vol. 10, No. 1, pp. 24-32, Jan.-Feb.
2. Ipakchi, A. and Albuyeh, F. (2009), Grid of the future, *Power and Energy Magazine, IEEE*, Vol. 7, No. 2, pp. 52-62, March-April.

3. Arnold, G. W. (2011), Challenges and opportunities in smart grid: A position article, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 99, No. 6, pp. 922-927, June.
 4. Arritt, R. F. and Dugan, R. C. (2011), Distribution system analysis and the future smart grid, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 47, No. 6, pp. 2343-2350, Nov.-Dec.
 5. The U.S. Department of Energy's Report (2008), The smart grid: An introduction.
 6. Ipakchi, A. and Albuyeh, F. (2009), Grid of the future, *IEEE Power Energy*, Vol. 7, No. 4, pp. 52-62, Mar./ Apr.
 7. Momoh, J. A., (2009), Smart grid design for efficient and flexible power networks operation and control, *IEEE Power Syst. Conf. Expos., PSCE*.
 8. Khan, H. A., Xu, Z. and H. Iu, Sreeram, V. (2009), Review of technologies and implementation strategies in the area of smart grid, *IEEE Power Eng. Conf.*
 9. Amin, S. M. (2008), For the good of the grid, *IEEE Power Energy*, pp. 48-59, Nov./Dec.
 10. McDonald, J. D. (2009), The Next-Generation Grid Energy Infrastructure of the Future, *IEEE Power and Energy Mag.*, Mar./ Apr.
 11. Rahman, S. (2009), Smart grid expectations, *IEEE Power Energy Mag.*, pp. 84-85, Sep./Oct.
 12. Katz, J. S. (2008), Educating the smart grid, *IEEE Energy 2030 Conf.*, Nov.
 13. Harris, A. (2009), Smart grid thinking, *IEEE Eng. Tech. Meet.*, June.
 14. Fan, J. and Borlase, S. (2009), The evolution of distribution, *IEEE Power Energy*, Mar./ Apr.
 15. Khurana, H. Hadley, M., Ning, L. and Frincke, D. A. (2010), Smart-grid security issues, *IEEE Trans. Sec. Privacy*, No. 1.
 16. Brown, R. E. (2008), Impact of smart grid on distribution system design, *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet. – Conv. Del. of Elect. Energy in the 21st Century*.
 17. Du, W., Slootweg, J. G., Thissen, W. A. H., Pruyt, E. and Walker, W. E. (2009), Transition to smart distribution grid strategic planning using a scenario approach, *20th Int. Conf. Elect. Dist., CIREN*, June.
۱۸. جهانگیری، پدram (۱۳۸۷)، بررسی، مدل‌سازی و ارزیابی طرح‌های متمرکز و گسترده‌ی اتوماسیون توزیع از نقطه نظر قابلیت اطمینان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف.
19. Northcote-Green, J. and Wilson, R. (2007), *Control and Automation of Electric Power Distribution Systems*, CRC Press.
 20. Staszkesky, D. M., Craig, D. and Befus, C. (2005), Advance feeder automation is here, *IEEE Power & Energy Mag.*, pp. 56-63, Sep./Oct.
 21. Hart, D. G., (2008), Using AMI to realize the smart grid, *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.- Conv. Del. Elect. Energy in the 21st Century*.
 22. Bruno, S., Lamonaca, S., Scala, M. L., Rotondo, G. and Stecchi, U. (2009), Load control through smart-metering on distribution networks, *IEEE Bucharest Power Tech. Conf.*, July.
 23. Albadi, M. H. and El-Saadany, E. F. (2007), Demand response in electricity markets: An overview, *Power Eng. Soc. Gen. Meet.*
 24. Climate Change Indicators in the United States, U.S. Environmental Protection Agency, Jun. 2010, [Online]. Available at: <http://www.epa.gov/climatechange/indicators.html>.

25. Key Indicators, Global Climate Change: NASA's Eyes on the Earth, 2010, [Online]. Available at: <http://climate.nasa.gov/keyIndicators/>.
26. Rahimi, F. and Ipakchi, A. (2010), Demand response as a market resource under the smart grid paradigm, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 1, No. 1, pp. 82-88, June.
27. Feldman, R. A. and Mazza, P. (Jan, 2007) Plug in Center.com: Electrify Transportation Briefing Book, [Online]. Available at: http://www.plugincenter.com/files/documents/Electrify_Transportation_Briefing_Book.pdf.
28. Updated List of Grid-Enabled Vehicles, World Team Now, July 2010, [Online]. Available at: <http://worldteamnow.org/gevs.html>.
29. Boulanger, A. G., Chu, A. C., Maxx, S. and Waltz, D. L. (2011), Vehicle electrification: Status and issues, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 99, No. 6, pp. 1116-1138, June.
30. Halliwell, J. (Mar, 2010), Nebraska Power Association: The (Near) Future of Electric Transportation-Utility Challenges and Opportunities. [Online]. Available at: http://www.nepower.org/NPA_presentations/John_Halliwell.pdf.
31. Liu, R., Dow, L. and Liu, E. (2011), A survey of PEV impacts on electric utilities, *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, 2011 IEEE PES, pp. 1-8, 17-19 Jan.
32. Kautto, N. and Jäger-Waldau, A. (2009), *Renewable energy snapshots*, JRC Scientific and Technical Reports, European Commission, <http://www.jrc.ec.europa.eu>.
33. Yan, Y., Qian, Y., Sharif, H. and Tipper, D. (2012) A survey on cyber security for smart grid communications, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 14, No. 4, Fourth Quarter.