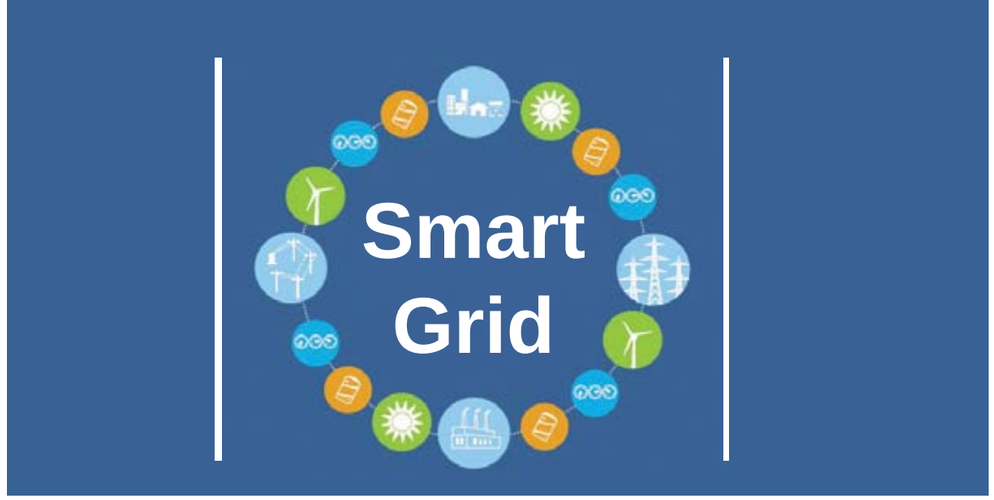


الزامات و نیازمندی‌های ارتباطی شبکه هوشمند برق

محمد حسین یغمایی مقدم / دانشگاه فردوسی مشهد / شرکت توزیع برق مشهد

چکیده:
زیرساخت فعلی شبکه‌های برق در ساختاری یک سویه، توان الکتریکی تولید شده در نیروگاه مرکزی را به مشترکین یا مصرف‌کنندگان عرضه می‌کند. با توجه به روند رو به رشد جمعیت، این زیر ساخت قادر به برآوردن نیاز روز افزون مشترکین نخواهد بود. دلیل اصلی اکثر خاموشی‌های گسترده را می‌توان زمان پاسخگویی کند سوئیچ‌های مکانیکی، عدم تجزیه و تحلیل ترافیک به صورت بلادرنگ، و عدم آگاهی از وضعیت اپراتورهای شبکه برق دانست. به منظور برطرف ساختن مشکلات موجود، شبکه هوشمند برق (Smart Grid) با ایجاد زیرساخت ارتباطی دوسویه، امکان برقراری ارتباط و تبادل اطلاعات بین مؤلفه‌های مختلف در سراسر شبکه برق را فراهم می‌سازد. در واقع، خاموشی‌های گسترده و کاستی‌های ساختار شبکه برق در طی سال‌های گذشته را می‌توان انگیزه‌ای جهت بررسی چالش‌های کنونی و حرکت به سمت ایجاد شبکه هوشمند از سوی محققین دانست.

۱- مقدمه

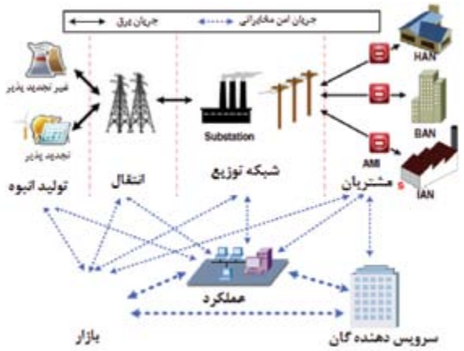
در ساختار کنونی، شبکه برق متشکل از نیروگاه‌های تولید توان الکتریکی، پست‌های انتقال، پست‌های توزیع و کاربران نهایی است[۱]. این چهار مؤلفه ساختار کلی سیستم قدرت را تشکیل می‌دهند. به عبارتی، شبکه برق مسئول تحویل توان الکتریکی از نقاط تولید به نقاط مصرف می‌باشد که معمولاً عملکرد آن بر اساس دو سیستم اولیه یعنی پست‌های انتقال و توزیع توصیف می‌شود. پست‌های انتقال توان الکتریکی را از نیروگاه تولید به پست‌های توزیع، و پست‌های توزیع نیز به نوبه خود آن را به مکان مشترکین تحویل می‌دهند. بنابراین شبکه برق موجود یک سیستم کاملاً سلسله مراتبی است که در آن نیروگاه‌ها در بالای زنجیره، تحویل قدرت به بارهای مشترکین در پایین زنجیره را تضمین می‌کنند. این سیستم اساساً هیچ منبع اطلاعاتی بلادرنگی در مورد نقاط پایانی در اختیار ندارد [۲].

گردش توان از منابع تولید متمرکز (نیروگاه‌ها) به سمت تقاضا، و گردش اطلاعات از مراکز بهره برداری ولتاژ پایین‌تر به سمت مراکز با ولتاژ بالاتر می‌باشد. بنابراین، شبکه برق فعلی ذاتاً دارای ارتباط یک سویه می‌باشد و به منظور حفظ قابلیت اطمینان، به گونه‌ای برنامه‌ریزی و طراحی می‌شوند تا بتوانند حداکثر تقاضای پیش بینی شده را تحمل کنند. در نتیجه به دلیل این که اوج تقاضا، تنها در کسری از ساعات روز رخ می‌دهد، سیستم مذکور ذاتاً غیر بهینه می‌باشد.

علاوه بر این، افزایش بی‌سابقه تقاضای توان، توأم با تأخیر در سرمایه گذاری در زیر ساخت‌های سیستم قدرت، پایداری سیستم را کاهش می‌دهد. در شرایط عدم وجود حاشیه امنیت کافی، هر گونه تقاضای شدید پیش بینی نشده یا امر غیر معمول در شبکه توزیع که باعث خطایی در قسمتی از شبکه شود، می‌تواند به خاموشی فاجعه آمیزی منجر شود. کمبودهای انرژی و آلاینده‌های زیست محیطی، انرژی تلف شده در خطوط انتقال و ساختار سلسله مراتبی از دیگر ضعف‌های این شبکه‌ها می‌باشند[۲]. از این رو، انگیزه‌های حرکت به سمت هوشمندتر ساختن شبکه برق را به طور خلاصه می‌توان بهبود انعطاف پذیری، امنیت، افزایش قابلیت اطمینان، بهره‌وری سیستم قدرت، کاهش خاموشی‌های گسترده و هم‌چنین کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دانست. با ادغام سیستم قدرت و فناوری ارتباطات و اطلاعات، جریان دو سویه ای برای توان الکتریکی و اطلاعات در سیستم قدرت فراهم خواهد شد. نتیجه‌ی این ادغام، شبکه‌ای هوشمند، قابل مدیریت و با بهره‌وری بالا خواهد بود.

درشکل ۱ معماری شبکه‌های هوشمند برق نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، زیرساخت‌های ارتباطی، جزو اساسی و کلیدی شبکه‌های هوشمند برق می‌باشد.

امروزه شرکت‌های برق به شدت به دنبال گزینه‌های ارتباطاتی‌ای هستند که آن‌ها را برای گسترش شبکه هوشمند برق و در نتیجه بهبود کارایی عملیات و افزایش بهره‌وری یاری نماید. یعنی در انتخاب خود باید پارامترهای مختلفی را مورد نظر قرار دهند. اول این که انتخاب آن‌ها باید قابل اعتماد باشد. در محیط ماموریت بحرانی، هیچ مصامحه‌ای قابل چشم پوشی نیست. از طرف دیگر شبکه باید فرصت اجرای سرویس‌های جدید به شیوه‌ای سریع و مقرون به صرفه را داشته باشد.



شکل ۱) معماری شبکه های هوشمند برق امروزی

۲- اهمیت و جایگاه زیرساخت ارتباطی در شبکه‌های هوشمند

شبکه هوشمند برق مجموعه‌ای از فناوری‌های ارتباطی را در جهت بهبود و ارتقا سیستم قدرت به کار می‌گیرد. اما در حال حاضر، قابلیت‌های ارتباطی سیستم‌های برق موجود محدود به مناطق محلی و در مقیاس‌های کوچک است[۳]. در نتیجه قادر به برآوردن خواسته‌های ارتباطی مورد نیاز جهت مدیریت خودکار و هوشمند شبکه‌های برق نسل آینده نخواهد بود. سیستم‌های برق آتی شامل انواع ژنراتورهای الکتریکی و مصرف‌کنندگان خواهند بود که به شکل توزیع شده‌ای در مناطق گسترده جای می‌گیرند و تمامی آن‌ها به‌طور یکسانی مدیریت می‌شوند[۳]. از این رو ارتباط دو سویه بلادرنگ مبنایی برای پشتیبانی از این سیستم مدیریت است.

در شبکه هوشمند برق، هر نقطه مصرف می‌تواند به نقطه تولید تبدیل شود، از این رو شبکه‌های ارتباطی باید قادر به انتقال اطلاعات به‌دست آمده به مرکز کنترل و پیام‌های کنترلی به نقاط مختلف در سراسر شبکه باشند. همچنین شبکه هوشمند برق در سطح توزیع، به تعامل با کاربر نهایی برای انجام اعمالی همانند نظارت بلادرنگ کنتورهای برق نیاز خواهد داشت. اگرچه در حال حاضر فناوری‌های ارتباطی در دسترس تا حد زیادی نیازهای ارتباطی معمول را برآورده می‌سازند، اما به‌کارگیری آن‌ها برای شبکه برق و پرداختن به الزامات ارتباطی در شبکه برق مسئله‌ای چالش برانگیز است. در شبکه هوشمندی که به شبکه ارتباطات امن مجهز شده است، ارایه برق با کیفیت بالا، قابل اطمینان و بدون توقف امکان‌پذیر خواهد بود. هم‌چنین شرکت‌ها به ارتباطاتی بلادرنگ دسترسی خواهند داشت که این ارتباطات برای تعامل با مصرف‌کنندگان در حفظ انرژی مورد نیاز است.

۳- معماری ارتباطات شبکه هوشمند برق

زیرساخت ارتباطی در شبکه‌های هوشمند برق باید فاکتورهای مورد انتظار شبکه برق را پشتیبانی و نیازهای عملکردی آن را برآورده سازد. به طوری که این زیرساخت تعداد زیادی از دستگاه‌های الکتریکی را به هم متصل و ارتباطات پیچیده دستگاه‌ها را مدیریت نماید. این زیرساخت ارتباطی در ساختاری سلسله مراتبی با زیر شبکه های به هم پیوسته ایجاد شده و هرکدام مسئولیت مناطق جغرافیایی مشخصی را بر عهده دارند. نمونه‌ای از این معماری در شکل ۲ نشان داده شده است[۴]. شبکه‌های ارتباطی در این زیرساخت را می‌توان در سه سطح عمده شبکه‌های گسترده، شبکه‌های توزیع و شبکه‌های دسترسی طبقه‌بندی نمود. شبکه‌های دسترسی، اجزای موجود در سطح مشتری را به یکدیگر متصل نموده و هدف اصلی این شبکه‌ها دست‌یابی به انرژی تبدیل شده در سمت مصرف‌کننده است. شبکه‌های توزیع، اطلاعات را از دستگاه‌های اندازه‌گیری هوشمند جمع‌آوری نموده و به نقطه backhaul انتقال می‌دهد. انتقال اطلاعات از نقاط backhaul به شبکه‌های برق نیز از طریق WAN انجام می‌پذیرد[۵].

۳-۱- شبکه‌های دسترسی

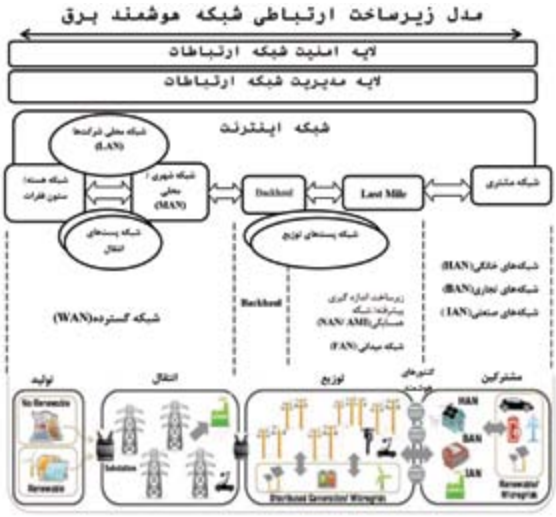
شبکه‌های دسترسی از اتصال تجهیزات موجود در محل مشتری حاصل شده و در سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند: شبکه‌های خانگی (HANs)، شبکه‌های صنعتی (IANs) و شبکه‌های تجاری یا اداری (BANs). از ویژگی این شبکه‌ها می‌توان به مواردی همچون کوچک بودن منطقه تحت پوشش، وسعت محدود، مصرف پایین برق، سهولت پیکربندی لوازم و دستگاه‌های متعدد، و همچنین قابلیت تعامل برای ارایه طیف گسترده‌ای از خدمات همانند مدیریت انرژی اشاره نمود.

ایجاد HANs در حوزه مشتری برای پیاده سازی نظارت و کنترل دستگاه‌های هوشمند در مکان مشتری و همچنین پیاده‌سازی فرآیندهای جدیدی همانند پاسخگویی بار و AMI امری ضروری است. تلاش‌های تحقیقاتی و استانداردسازی در حال یکپارچه نمودن فناوری‌های شبکه‌های خانگی در ایجاد توانایی مدیریت هوشمند انرژی برای لوازم خانگی می‌باشند. شبکه مشترکین معمولاً با استفاده از فناوری‌های بی‌سیم مانند ZigBee ایجاد می‌شود و امکان کنترل و برقراری ارتباط را برای وسایل الکتریکی فراهم می‌کند. این شبکه همچنین می‌تواند از طریق دروازه مخصوص به اینترنت متصل شود.

۳-۲- شبکه‌های توزیع

شبکه‌های توزیع از شبکه‌های Lastmile و Backhaul تشکیل شده‌اند. شبکه Lastmile، یک شبکه ارتباطی دو سویه است که سیستم توزیع برق را پوشش می‌دهد. Lastmile را می‌توان به عنوان شبکه‌ای تعریف نمود که بیشتر عناصر سیستم توزیع برق همانند کنتورهای هوشمند، دستگاه‌های حوزه هوشمند، کنترل بار در آن قرار می‌گیرند. این شبکه، معمولاً به عنوان شبکه‌های همسایه ([1]NANs)، شبکه‌های میدانی ([2]FANs) و یا زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته (AMI) شناخته می‌شود. به طور معمول NAN ها شامل شبکه‌ای از نقاط دسترسی واقع در سراسر سیستم توزیع برق می‌باشند. NAN ها، شبکه‌ای را در میان کنتورهای هوشمند ایجاد نموده و آن‌ها را به نقاط دسترسی محلی متصل می‌سازد. NAN دارای قابلیت ارتباط دو سویه برای قرائت کنتورها، پاسخگویی بار، قیمت‌گذاری پویا و قطع از راه دور می‌باشد. شبکه‌های میدانی اتصال بین پست‌های توزیع برق را فراهم می‌آورند. به‌طور کلی، FANها ارتباطات ساده و روانی را برای سیستم‌های توزیع برق ایجاد می‌نمایند. حسگرهای الکتریکی بر روی فیدرها و ترانسفورماتورهای توزیع، دستگاه‌های IED که قادر به انجام دستورات کنترلی از DMS می‌باشند، DERها، ایستگاه‌های PEV و کنتورهای هوشمند در مکان مشتری از منابع اصلی اطلاعات برای نظارت و کنترل در حوزه توزیع میباشند. برنامه‌های کاربردی که در سیستم توزیع اجرا می‌شوند از FAN برای اشتراک و تبادل اطلاعات بین بخش‌های نام برده، استفاده می‌کنند.

شبکه‌های Backhaul عمدتاً از پهنای باند اتصال به شبکه‌های NAN و FAN برای جمع‌آوری داده از نقاط تجمیع داده ([3]DAP) استفاده می‌کنند. این شبکه می‌تواند داده‌های کاربرهای متعدد از جمله سیستم اتوماسیون و کنترل توزیع، دستگاه‌های حسگر و همچنین داده‌های حاصل از سیستم‌های SCADA که در سیستم‌های توزیع



شکل۲) معماری ارتباطات شبکه هوشمند برق

بـرق یا شبکه‌های انتقـال برق واقع شده‌اند را جمـع‌آوری نمایند. در شبکه‌هـای گسترده، backhaul بایـد قابلیت پشتیبانی ظرفیت بالای اتصال را داشته باشند. Backhaul شبکه Lastmile را به WAN متصل می‌کنـد و می‌توانـد تحت مالکیت شرکت‌ها یا توسـط ارایه‌دهندگان سرویـس ارایه شود. Backhaul داده‌هایـی همانند داده‌های تله‌متری مشترکیـن، داده‌هایی بـا پارامترهای بحرانی اتوماسیـون توزیع را از Lastmile جمع‌آوری و به شرکت‌های نهایی منتقل می‌کند. همچنین به‌طور بالعکـس، اطلاعاتی را از سمت WAN به شبکه مشتری انتقال می‌دهد (همانند اطلاعات قیمت‌گـذاری). به عبارت ساده Backhaul بـه عنوان کانالی برای توزیع داده‌ها بین ایستگاه مشترکین و ایستگاه اصلی به‌کار می‌رود.

۳-۳- شبکه گسترده

مهم‌ترین قسمت از شبکه‌های گسترده را شبکه هسته/ ستون فقرات[۴] تشکیـل می‌دهد. شبکه هسته با نرخ بـالای داده، حداقل زمان تاخیر و معمـولاً با استفـاده از فیبر نوری دفاتر مرکـزی و پست‌های برق را به یکدیگر متصل می‌کند. شبکه‌های گسـترده در واقع ستون فقرات ارتباطی شبکه هوشمند بـرق جهت اتصال شبکه‌های کوچکتر توزیع شـده که در مکان‌های مختلف بکار گرفته شده‌اند را تشکیل می‌دهد. هنگامی‌که مراکز کنترل در فاصله زیادی از پست‌ها یا مصرف‌کنندگان نهایی قرار گرفته‌انـد، اندازه‌گیری‌های بلادرنگ حاصل از دستگاه‌های الکتریکـی از طریق WAN به مراکز کنترل منتقل می‌شوند. همچنین بـه طور بالعکس،WAN مسئولیت انتقال دستورالعمل‌های کنترلی از مراکز کنترل به دستگاه‌های الکتریکی را نیز بر عهده دارد.

۴- الزامات ارتباطی شبکه هوشمند برق

همان‌طور که پیش‌تـر بیان شده، زیرساخت‌هـای ارتباطی در شبکه هوشمنـد برق عهـده‌دار مسوولیت مهـم تبادل اطلاعـات است. این زیرساخـت، اساسی برای انجام وظایف متفاوت دستگاه‌های الکتریکی توزیـع شده در مکان‌های مختلف است. عملکرد ارتباطی نامطلوب، نه تنهـا شبکه هوشمند بـرق را از دستیابی به بهـره‌وری کامل از انرژی و کیفیـت سرویس محدود می‌سـازد، بلکه می‌تواند منجر به خسارات بالقـوه‌ای در سیستم برق گـردد. برای حافظـت از SG و اطمینان از عملکرد مطلوب آن، زیرساخت ارتباطی باید الزامات متعددی همچون تاخیر، قابلیـت اطمینان، امنیت، همگامی زمانـی، پشتیبانی از چند پخشی و سهولت در توسعه و نگهداری را برآورده سازد[۳،۶،۷].

۴-۱- تأخیر شبکه

تاخیـر شبکه به صـورت حداکثر زمـان دریافت یک پیـام خاص از طریق شبکـه ارتباطی، تعریف می‌گردد. تأخیر سیگنال در برنامه‌های کاربردی حفاظتـی و کنترلـی (ماننـد Teleprotection و WACS)، یکی از پارامترهای بسیـار مهم و اساسی است. پیام‌های ارتباطی بین موجودیت‌هـای مختلف در شبکـه برق ممکن اسـت نیازمندی‌های تأخیر متفاوتـی داشته باشند. برای مثال، اطلاعات مربوط به حفاظت و دستورات مبادله شده بین IEDها در شبکه برق به تأخیری پایین‌تر نسبت بـه پیام‌های اطلاعات SCADA مبادلـه شده بین حسگرهای الکتریکـی و مراکز کنترل نیاز خواهنـد داشت. علاوه بر این، پیام‌های مبادله شده می‌توانند رویداد محور (مانند پیام‌های مربوط به حفاظت و کنترل) و یا به صورت دورهای باشند (مانند پیام‌های نظارت و پایش[۵]).

۴-۲- قابلیت اطمینان

یکـی از اصلی‌تریـن مسائل در انتخـاب رسانه‌هـای ارتباطی، قابلیت اطمینان ایـن رسانه‌ها می‌باشد. عملکرد ارتباطی شبکه هوشمند برق وابسـته به ستون فقرات ارتباطـی در حوزه‌های مختلف جهت ارسال و دریافـت پیام‌هـای بحرانی به‌منظور حفظ پایـداری است. از این رو شبکه ارتباطی ستون فقرات با قابلیت اطمینان بالا برای تبادل پیام‌ها به‌موقـع بسیار مهم خواهد بود. این شبکـه ارتباطی توسط نقص‌های احتمالی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم در فاز طراحی و یافتن روشی برای بهبود آن امری ضروری است.

۴-۳- امنیت

شبکه‌هـای هوشمند برق، به‌طور گسـترده در مناطق مختلف توسعه خواهـد یافـت. از این رو مسائل مربوط به امنیـت فیزیکی و سایبر از اهمیت بالایی برخوردار است. علاوه بر این، اگر رسانه ارتباطی بی‌سیم مانند WiFi یا ZigBee به عنوان بخشی از شبکه ارتباطی به‌کار گرفته شونـد، به دلیل ماهیت اشتراکـی و قابل در دسترس بودن این رسانه، مسئله امنیت اهمیت بیشتری می‌یابد. از این رو برای ارایه حفاظت‌های امنیتـی برای شبکه‌های برق، نیاز به شناسایی برنامه‌های کاربردی که از ارتباطات مختلفی استفاده می‌کنند (به عنوان مثال مدیریت سمت تقاضـا، قرائت پیشرفته کنتـور، ارتباطات بیـن دستگاه‌های مدیریت هوشمنـد انرژی و مدیریت هوشمند خرابی) و پیدا کردن راه حل‌های امنیتی مناسب برای هر یک از آن‌ها نیاز خواهیم داشت. به عنوان یکی از راه حل‌هـای ممکن می‌توان از مجوز دسترسی به داده‌های بلادرنگ و توابع کنترلی نـام برد. همچنین برای داشتن درجه بالایی از امنیت در شبکه ارتباطی سیستم قدرت نیازمند استفاده از الگوریتم‌های رمز گذاری برای ارتباطات در مناطق جغرافیایی گسترده جهت پیشگیری از اختلال می‌باشد.

۴-۴- همگامی زمانی

برخـی از دستگاه‌هـای موجود در شبکه برق نیاز بـه همگامی زمانی دارند. الزامات مورد نیاز برای همگامی زمانی یک دستگاه به حساسیت برنامـه کاربردی بستگی دارد. نیازمندهای تحمل‌پذیری و دقت جهت همگامـی زمانی برای IED ها که داده‌های حساس به زمان را پردازش می‌کننـد بسیار مهـم است. به عنوان مثال PMUهـا نیاز شدیدی به هماهنگی‌هـای زمانی دارنـد، به این علت که آن‌هـا اندازه‌گیری‌های بلادرنـگ از مقادیر ولتاژ و جریان را در سراسر شبکه برق برای آنالیز، اندازه‌گیری و کنترل ارایه می‌کنند. پروتکل PTP[۶] تعریف شده توسط استانـدارد IEEE1588، همگامـی زمانی را با دقت نانـو ثانیه بر روی شبکه‌های اترنت فراهم می‌کند. GPS و STNP[۷] نیز روش‌های دیگری

ادامه در صفحه ۳۶

ادامه از صفحه ۲۴

برای دست‌یابی به همگامی زمانی هستند.

۴-۵- پشتیبانی از چند پخشی

مفهـــوم چند پخشی برای برنامه‌های کاربردی سیستم برق بسیار حائز اهمیت است، که در آن یک پیام حاوی مقادیر آنالوگ، تغییر وضعیت و یا دستوراتی است که می‌توانند در یک لحظه با چندین برنامه کاربردی در ارتباط باشند. بنابراین به جای اینکه چندین پیام به صورت جداگانه آدرس‌دهی شوند، یک پیام چند پخشی به یک سوئیچ ارسال و سوئیچ نیز آن را بـــه تمامی پورت‌های خروجی ارســـال می‌کند. دستگاه‌های دریافت‌کننده برای گوش دادن به آدرس چند پخشی خاص، می‌توانند به سادگی پیکربندی شوند.

۴-۶- سهولت توسعه و نگهداری

برای سیستم‌های ارتباطی توزیع شـــده باید مکانیزم‌هایی پیش‌بینی شـــود که نه تنها باعث تسهیل نصب اولیه شـــود، بلکه زیرساخت‌های ارتباطـــی را نیز در طی عملیات حفظ می‌کند. ویژگی‌هایی مانند آنالیز حالت خطا و مکان‌یابی خطا، به روز رسانی آسان نرم افزار و سخت افزار و تنظیمات راه دور از عوامل ضروری هستند.

۵- نتیجه گیری

شبکه هوشمند برق را می‌توان یک سیستم بالقوه تحویل انرژی برق با دو مؤلفـــه مهم دانست. اولین مؤلفه زیرساخت ارتباطی بلادرنگ، قابل اطمینان و با ظرفیت بالا برای برآوردن نیازهای رو به رشد شبکه برق (همانند تأیید صورت حساب بـــه واسطه مشتریان، مدیریت و کنترل بار در کل شبکه، بهینه‌سازی دارایی‌های شبکه برق و...) است. دومین مؤلفـــه، فناوری اطلاعات یکپارچه‌ای است که حجم زیادی از اطلاعات را در سراسر شبکه هوشمند برق پردازش و بررسی می‌کند. به منظور اجرایـــی ساختن مفهوم شبکه هوشمند برق و چشم انداز تعیین شده، این سیستم مستلزم توسعه و به‌کارگیری طیف گسترده‌ای از فناوری‌ها، از جمله فناوری‌های مربوط به زیرساخت ارتباطی است. این زیرساخت با ایجاد جریـــان ارتباطی دوسویه، سریـــع و یکپارچه، شبکه‌ای پویا و تعاملـــی را برای مبادله اطلاعات و تـــوان الکتریکی به صورت بلادرنگ فراهم می‌ســـازد. از این رو، انتخاب معمـــاری مناسب برای زیرساخت ارتباطی و به خصوص شبکه ستون فقرات، بسیار مهم می‌باشد.

***

پی‌نوشت

1. Neighborhood Area Network
2. Field Area Network
3. Data Aggregation Point
4. Core/ Backbone Network
5. Monitoring
6. Precision Time Protocol
7. Simple Time Network Protocol

مراجع

[1] NIST, “NIST framework and roadmap for Smart Grid interoperability standards”, Release 1.0, 2010.

[2] Rahimi. F, Ipakchi. A, “Demand Response as a Market Resource under the Smart Grid Paradigm”, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 1, NO. 1, 2010, pp. 82-88.

[3]Wang. W, Xu. Y, Khanna. M, “A survey on the communication architectures in smart grid”, Computer Networks and ISDN Systems, Vol. 55, Issue 15, 2011, pp. 3604–3629.

[4] IEEE Standards “IEEE Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System (EPS),End-Use Applications, andLoads”, IEEE Std 2011-2030, 2011, pp. 1 – 126.

[5] NETL, “Broadband Over Power Lines Could Accelerate the Transmission Smart Grid”, 2010.

[6] Adamiak. M, Patterson. R, Melcher. J, “Inter and intra substation communications: requirements and solutions”.

[7] M. Shargal and D. Houseman, “The Big Picture of Your Coming Smart Grid”, Article, Mar. 2009. Available online: http://www.smartgridnews.com/artman/publish/commentary/The_Big_P icture_of_Your_Coming_Smart_Grid-529.html.