معماری شبکه‌های انرژی الکتریکی، چرا و چگونه؟

علی اخوین[۱،*]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۱۱
پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۱

واژگان کلیدی:
سیستم قدرت،
معماری شبکه،
هماهنگی اجزاء،
مدیریت دارایی.

چکیده

به‌دلیل پیچیدگی و ابعاد بزرگ سیستم‌های قدرت از یکسو و اضافه شدن تجهیزات و فن‌آوری‌های نوین از سوی دیگر، فرآیند توسعه این سیستم‌ها در معرض ناهماهنگی قرار دارد. یک نمونه از ناهماهنگی این است که کارهای توسعه و اضافه شدن فن‌آوری‌های جدید بصورت محلی انجام شوند و در آینده معلوم شود که این کارها یا فن‌آوری‌ها چه اثراتی در کل سیستم دارند. چنین رویکردی، یکپارچکی و امنیت سیستم قدرت را در درازمدت با چالش روبرو می‌کند. ضمن اینکه، ازنظر اقتصادی می‌تواند به اتلاف سرمایه و ضعف در مدیریت دارایی منجر شود. بحث معماری شبکه برای برطرف کردن این مشکلات در سالهای اخیر مطرح شده است. خروجی معماری شبکه، معمولاً الگوها، مدل‌ها یا نقشه‌هایی است که از دید کلان و با توجه به اهداف و نیازهای کیفی سیستم قدرت، فعالیت‌های پایین دست را با فعالیت‌های بالادست این سیستم هماهنگ کنند. این مقاله به ارائه مفاهیم، مراحل، نکات و چالش‌های معماری شبکه می‌پردازد. نگرشی کلی دراین‌خصوص ارائه می گردد که برای محققین و دست‌اندرکارن صنعت برق مفید واقع شود.

۱-مقدمه

سیستم‌های تأمین انرژی الکتریکی، که اصطلاحاً با عنوان سیستم‌های قدرت شناخته می‌شوند، یکی از بزرگترین و تأثیرگذارترین سیستم‌های ساخت بشر هستند که نقش مهمی در توسعه و تحول جوامع بشری ایفا کرده‌اند. با تغییر سبک زندگی و توقعات مصرف‌کنندگان (مشترکین برق) سیستم‌های قدرت در معرض موارد جدیدی قرار می‌گیرند که توسط نهادهای (Entities) مختلف مورد نیاز هستند. ازجمله این نهادها، می‌توان به مصرف‌کنندگان، تولیدکنندگان (ژنراتورها یا منابع تولید) و دست اندرکاران مدیریت و بهره‌برداری سیستم قدرت اشاره کرد. این موارد، با پیشرفت فن‌آوری‌های دیجیتال، مخابرات و تولید، از اهمیت بیشتری برخوردار می‌شوند. دراین‌خصوص، نکات زیر قابل ذکر هستند [۱-۸]:

۱) پیدایش منابع تولید با فن‌آوری‌های جدید که بیشتر مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر و در مقیاس کوچک هستند: دلایل متعددی ازقبیل اقتصادی، زیست‌محیطی، صنعتی و اجتماعی، علت پیدایش این منابع تولید است که انتظار می‌رود بیشتر در پایین دست یا شبکه توزیع و نزدیک به قلمرو مصرف‌کنندگان نهایی نصب شوند. این منابع می توانند تأثیر قابل‌توجهی در کارکرد سیستم قدرت داشته باشند و همچنین به نتایج ناخواسته یا پیش‌بینی نشده منجر شوند. مثلاً، بازنشستگی زودهنگام بخشی از نیروگاه-های حرارتی بزرگ؛ افزایش تغییرات و عدم‌قطعیت در تولید که می‌تواند بر امنیت (Security) و قابلیت اطمینان (Reliability) سیستم تأثیر منفی بگذارد؛ افزایش بکارگیری ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی برای جبران تغییرات تولید؛ نیاز به روش‌های جدید برای حفظ فرکانس، پایداری و قابلیت‌اطمینان؛ دوطرفه شدن جهت توان در شبکه توزیع؛ مشکل شدن کنترل ولتاژ در شبکه مذکور؛ نیاز به بازنگری روش‌های حفاظت سیستم قدرت و اینکه ممکن است مالکین یا بهره‌برداران این منابع مایل باشند در

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: a_akhavein@azad.ac.ir
۱. دانشکده فنی ومهندسی-گروه برق- دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب- تهران - ایران

یک ساختار بازار برق، خدمات خود را به فروش برسانند.
۲) افزایش تمایل و نیاز برای مشارکت در مدیریت مصرف: به‌دلایل فنی و بخصوص اقتصادی (مانند قیمت‌های متغیر برق و مشوق‌های مالی) تمایل مصرف کنندگان دراین‌خصوص، رو به افزایش است، که عموماً بصورت برنامه‌های مدیریت مصرف یا پاسخ تقاضا (Demand response) اجرایی می‌شود. از دید اپراتور یا بهره‌بردار سیستم قدرت، خروجی این برنامه‌ها، می‌تواند بصورت منابع مجازی قلمداد و برای کمک به مدیریت توان یا کاهش قیمت برق بکار گرفته شود.
۳) پیدایش شبکه‌های توزیع فعال (Active): اجرای برنامه‌های پاسخ تقاضا در کنار اضافه شدن منابع تولید پراکنده، شبکه‌های توزیع را از حالت غیرفعال (Passive) سنتی یا مصرف‌کننده صِرف، به حالت فعال، تغییر می‌دهد. این شبکه‌ها، همچنین می‌توانند با تجمیع تولید و مصرف پایین‌دست، باعث ایجاد فرصت‌های جدید در خرید و فروش برق شوند.
۴) افزایش بکارگیری انواع جدید و غیرخطی بارها: یک نمونه از این بارها، خودروهای برقی هستند که از سیستم قدرت شارژ می‌شوند. الگوی مصرف این بارها با الگوی بارهای سنتی تفاوت قابل‌توجهی دارد. تعداد زیاد چنین بارهایی، می‌تواند بهره‌برداری از شبکه توزیع را دستخوش تغییر کند.
۵) تجدیدساختار (Restructuring) و ایجاد بازارهای برق: این تغییر و تحول، در بعضی از سیستم‌های قدرت برای ایجاد راهکار خرید و فروش برق نظیر خرید و فروش یک کالا، ایجاد شد. برای این منظور، سازماندهی و نهادهای سیستم قدرت دچار تغییر شدند. علاوه بر ملاحظات فنی، ضروری است که مسائل مالی نظیر ایجاد انگیزه برای مشارکت سرمایه‌گذاران و ایجاد جریان‌های مالی مناسب بین طرف‌های معامله برق، لحاظ گردند.
۶) ظهور نهادهای جدید: این نهادها می‌توانند در اثر مشارکت مصرف‌کنندگان در بهره‌برداری از سیستم قدرت پدید آیند. تجمیع‌کننده (Aggregator) یک مثال از این نهادها است که نماینده گروهی از مصرف‌کنندگان است. مثال دیگر، نهادهایی هستند که در اثر تجدید ساختار ایجاد می‌شوند، مانند شرکت تولید و خرده‌فروش (Retailer) برق. همچنین ممکن است نهادهای جدید دراثر ملاحظات محلی و جغرافیایی تولید و مصرف پدید آیند، مانند ریزشبکه (Micro-grid).
۷) افزایش میزان هوشمندی: برای رسیدن به یک شبکه هوشمند، لازم است که تعداد قابل‌توجهی از وسایل اندازه‌گیری، پردازش و تصمیم‌گیری محلی به سیستم قدرت، بخصوص در شبکه توزیع، اضافه گردند و سیستم‌های کنترل و مخابرات برای آنها بکار گرفته شود.
۸) تعامل با سیستم‌های انرژی خارج از سیستم قدرت: با توجه به محدودیت‌های حامل‌های انرژی، هماهنگی سیستم قدرت با شبکه‌های گازرسانی و در بعضی موارد شبکه‌های تأمین گرمایش محلی، ضروری است.
موارد فوق، باعث مشکلات و چالش‌هایی می‌شوند که سیستم‌های قدرت در حال یا آینده با آنها روبرو است. یکی از این مشکلات، افزایش عدم‌هماهنگی در کل سیستم می باشد. چراکه با توجه به ابعاد زیاد سیستم قدرت، معمولاً چنین مرسوم بوده که فعالیت‌های توسعه و اضافه کردن فن‌آوری‌های جدید، بیشتر بصورت محلی یا در بخشی از سیستم انجام شود. این فعالیت‌ها در بیشتر موارد از دید بقیه بخشهای سیستم پنهان می‌ماند. مانند این است که کارهای پراکنده‌ای انجام و بعد ملاحظه شود که نتیجه آنها در سطح بالاتر یا در کل سیستم چیست. چنین رویکردی در درازمدت، به عملکرد باثبات منجر نخواهد شد و ازنظر اقتصادی نیز می‌تواند با هزینه‌های اضافی روبر گردد.
به عنوان نمونه برای این هزینه‌های اضافی، می‌توان به هزینه‌های غیرمستقیم ناشی از نقص در هماهنگی بین تجهیزات و فعالیت‌های مرتبط با آنها اشاره کرد. این نقص می‌تواند هزینه‌های پیشامدها و تعمیر و نگهداری را افزایش دهد [۹].
یک دغدغه مهم فعلی یا آینده در سیستم‌های قدرت، ایجاد هماهنگی و سازگاری فعالیت‌ها در آنها، از دید کلان است. بحث معماری شبکه (Grid architecture) برای برطرف کردن این دغدغه توسط محققین و دست‌اندرکاران صنعت برق در سالهای اخیر مطرح شده است. به این دلیل که سیستم قدرت به ساختمانی بسیار بزرگ مشابه شده و فعالیت‌های ساخت و توسعه در گوشه و کنار آن، بدون هماهنگی و نقشه‌های معماری در حال جریان است. می‌توان گفت که ساختار سیستم‌های قدرت امروزی، حالت "تصادفی" یا "این چنین شده" پیدا کرده است. یعنی برای برآوردن نیازهای مختلف سیستم، اجزای مختلفی به آن اضافه شده‌اند و وسعت سیستم به اندازه امروزی رسیده، اما

اینکه تا چه اندازه تعامل بین اجزا و یکپارچگی سیستم وضعیت مطلوبی دارد، مغفول مانده است [۹].
اگر وضع به همین منوال پیش رود، بزودی سیستم قدرت دچار مشکلات و اختلال عملکرد می‌شود. لذا، معماری شبکه باید مورد توجه قرار گیرد که جلوی این مشکلات گرفته شود. هدف معماری شبکه، ایجاد نگرشی در کل سیستم است که از هماهنگی بین بخشها و زیر سیستم‌های مختلف، و هماهنگی فعالیت‌های از پایین به بالا با فعالیت‌های از بالا به پایین، اطمینان حاصل کند [۱ و ۱۰]. ازجمله اهداف معماری شبکه، می‌توان موارد زیر را ذکر کرد [۱]:

- ارائه وضعیت فعلی و محدودیت‌های ساختاری برای مدرن‌سازی سیستم؛
- تعیین موارد و پتانسیل‌های تجهیزات و فن‌آوری‌های جدید و بخشهایی از سیستم که با آن درگیر می‌شوند؛
- مشخص شدن مواردی از توسعه شبکه که به سیاست‌گذاری‌های صنعت برق و رویکردهای اجتماعی مربوط هستند؛
- ارائه مدلی که ارتباط و تعامل بین زیرسیستم‌ها را نشان دهد و هماهنگی و سازگاری توسعه و بهره‌برداری را از دید کل سیستم قدرت ممکن سازد؛
- بهبود مسئولیت‌ها و هماهنگی در مدیریت شبکه و سرمایه‌گذاری؛
- کارآمدتر کردن روش‌های پیش‌بینی، مدل‌سازی، شبیه‌سازی و طراحی؛
- بازنگری قوانین و فرآیندهای تنظیم و کنترل؛ نوآوری در استانداردها؛
- کارآمدسازی سیستم مخابرات؛
- ارائه یا بهبود مدل‌های بازار برق.

مقالات و گزارش‌های مرور شده در این قسمت، بیشتر از دیدگاه یا حوزه کاری خود به بحث معماری شبکه پرداخته اند. به‌عنوان نمونه، در[۱]، معماری شبکه از دید الزامات استاندارد آمریکایی و در [۲] بحث مذکور از دید نیازمندی-های استاندارد انگلیسی مطرح شده است. مقاله [۵] مطالب مفیدی از دید حوزه کاری شبکه هوشمند در کشورهای اروپایی ارائه می‌دهد. مثال‌های معماری مرتبط با شبکه هوشمند همچنین در [۹] و [۱۲] آمده است. مقاله [۱۱]، نمونه‌ای برای معماری زیرسیستم کنترل در سیستم قدرت ارائه می‌دهد. نمونه‌های فوق، لزوماً برای سیستم‌های قدرت در نقاط مختلف جهان صادق یا قابل استفاده نیستند. از اینرو، مفید به‌نظر می‌رسد که موارد مشترک در بین مراجع استخراج شوند. این اشتراکات باید به‌نحوی مشخص شوند که اولاً مخصوص به یک کشور یا حوزه کاری نباشند و ثانیاً مفاهیم و مراحلی را تعیین کنند که اغلب در معماری شبکه بکار می‌روند. هدف این مقاله، ارائه این موارد مشترک است.

۲- مفاهیم و مراحل اجرای معماری شبکه

معماری شبکه، حالت خاصی از مبحث معماری سیستم (System architecture) است. مبحث دوم، با مفهوم "سیستمی از سیستم‌ها" سر و کار دارد. به‌عنوان نمونه، یک سیستم قدرت، با ترکیب متنوعی از شرایط بهره‌برداری، نرم‌افزارها و روشهای محاسباتی و سازندگان تجهیزات مختلف روبرو است. لذا، سیستم قدرت را می‌توان سیستمی از سیستم‌ها محسوب کرد که بحث معماری سیستم درخصوص آن قابل اعمال است. دیدگاه سیستمی از سیستم‌ها، بویژه برای تشخیص و لحاظ کردن تعامل بین بخشها و اجزای یک سیستم پیچیده مفید است[۵].در معماری سیستم، تعیین پاسخ سوال‌هایی نظیر آنچه که در جملات بعدی ذکر می‌شود، مد نظر است. نحوه طراحی و ساخت یک سیستم پیچیده چگونه باید باشد؟ سازماندهی و ارتباط اجزای فیزیکی چه وضعیتی دارد و به چه وضعیتی باید برسد؟ روش مناسب برای ارزیابی کلان سیستم از جنبه‌های اطلاعاتی، عملیاتی و اقتصادی چیست؟ با پاسخ به این سوال‌ها، توصیف و کارکردهای مطلوب اجزا یا بخشهای مختلف سیستم و نحوه تعامل یا ارتباط بین آنها مشخص می‌گردد. بر این اساس، معماری سیستم را می‌توان بصورت توصیف ساختاری که اجزای سیستم را در برمی‌گیرد و فعل و انفعال بین اجزای مذکور تعریف کرد. این توصیف همچنین می‌تواند به پیاده‌سازی توسعه سیستم کمک کند [۹]. حاصل معماری، یک مدل است که امکان نگرش با دید کلی از سیستم، ویژگی‌ها و نحوه تعامل اجزای آن را فراهم می‌کند [۱ و ۲].
هنگامی‌که سیستم مورد نظر، سیستم قدرت باشد موضوع معماری سیستم به مبحث معماری شبکه منجر می‌شود. معماری شبکه، برای پاسخ به نیازها و چالش‌هایی که در قسمت قبلی این مقاله ذکر شد، طی سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است.

شکل (۱)، مراحل معماری سیستم قدرت را نشان می‌دهد که برمبنای نگرش سیستماتیک از بالا به پایین و با ملاحظه سیاست‌گذاری‌ها و اهداف است [۱ و ۲]. این موارد، عموماً به تصمیم‌گیری، قانون‌گذاری و اداره سیستم در سطح کلان مربوط می‌شود. متناظر با سیاست‌گذاری‌ها و اهداف، نیازهای کیفی باید مشخص گردد. نیازهای کیفی برمبنای چشم‌انداز آینده سیستم قدرت و خدمات مورد انتظار، بخصوص با توجه به نیازهای مصرف‌کنندگان، تهیه می‌شود. سپس، ویژگی‌ها یا کارکردهای متناظر با نیازهای کیفی تعیین می‌گردد. منظور از کارکرد در اینجا، اقدامی است به تناسب یک نیاز یا انجام یک کار در سیستم. در مرحله بعدی ساختارها و اجزای مربوطه، مشخص می‌گردد. به بیان دیگر، چیزهایی که وجود و تعامل آنها برای رسیدن به نیازها و کارکردها، ضروری است. بطور طبیعی، محدودیت‌های ساختاری و فنی نیز در این مرحله مورد توجه قرار می‌گیرند. مرحله پایانی، به ارزیابی و بهینه‌سازی این ساختارها و اجزاء اختصاص دارد تا اطمینان حاصل گردد که اهداف کلان و نیازهای کیفی برآورده می‌شوند.

یک روند تکراری بین مراحل می‌تواند وجود داشته باشد که اگر مرحله بعدی نتایج رضایتبخش نداشت، فرآیند به مرحله (مراحل) قبلی برگردد.

همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، خروجی مراحل می‌تواند نقشه‌هایی باشد که نظیر نقشه‌های معماری ساختمان، در کنار یکدیگر قرار گیرند تا از هماهنگی مورد نظر، اطمینان حاصل شود.

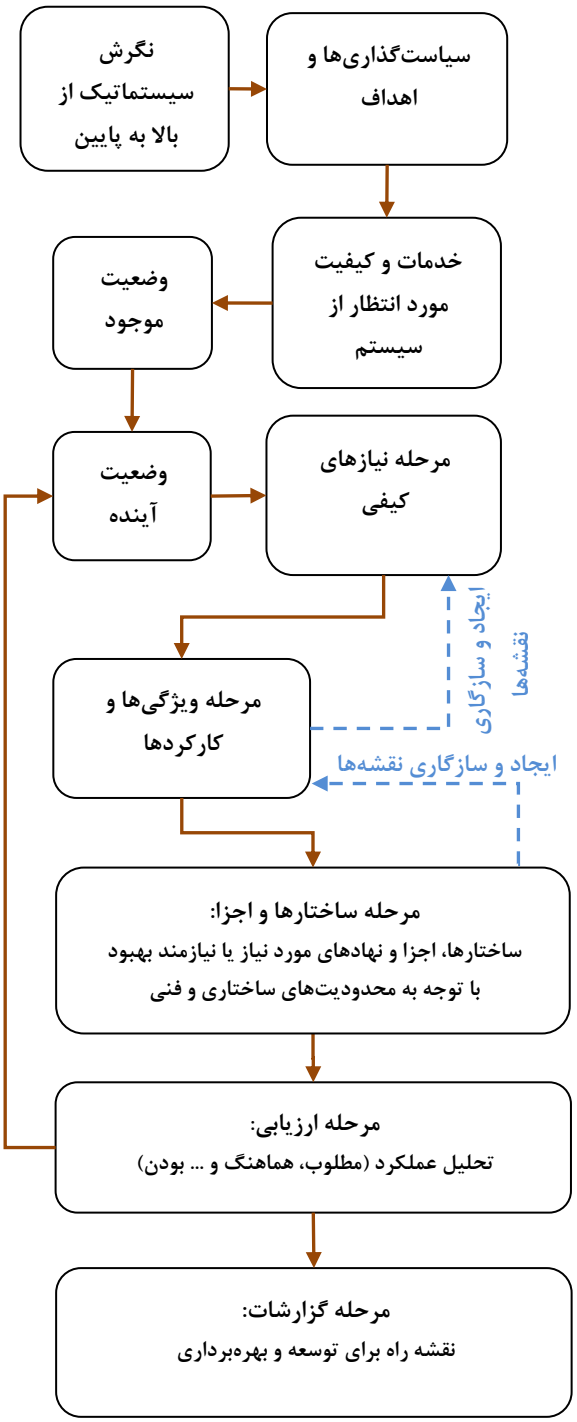
در ادامه این قسمت، مراحل اخیر بیشتر تشریح می‌شوند.

۲-۱- نیازهای کیفی

با توجه به سیاست‌های فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی و نهادهای اصلی درگیر با سیستم قدرت، و بخصوص مصرف‌کنندگان، فهرستی از نیازهای کیفی تهیه می‌شود، که به‌عنوان نمونه می‌تواند شامل موارد زیر باشد [۱، ۲ و ۴]:

- ایجاد انعطاف‌پذیری، هماهنگی و مقیاس‌پذیری (Scalability) هم در توسعه و هم در بهره‌برداری؛
- پذیرش فن‌آوری‌های جدید تولید و ایجاد تغییرات لازم برای پذیرش آنها؛
- هماهنگی مشوق‌های مالی و ایجاد محرک‌های مبتنی بر قیمت؛
- ایجاد یا تسهیل امکان خرید و فروش خدمات وابسته به برق و توجه به نیازهای سرمایه‌گذاران؛
- تدارک روش‌های مدیریت و کنترل جدید متناظر با نهادهای متنوع موجود در سیستم؛
- هماهنگی با سیستم‌های انرژی خارج از سیستم قدرت؛

تاب‌آوری (Resiliency) سیستم در برابر حوادث و بهبود مدیریت سیستم پس از وقوع آنها.



شکل ۱- روند کلی معماری

موارد فوق، نظیر تلاش به رسیدن به یک محصول (معماری)، برمبنای توصیف و مشخصات مورد نیاز از آن محصول است [۵].

انعطاف‌پذیری و مقیاس‌پذیری دو نیاز مهم هستند که بخصوص در پذیرش پاسخ تقاضا و فن‌آوری‌های جدید تولید بکار می‌آیند [۲]. منظور از مقاوم بودن این است که سیستم قادر باشد تحت شرایط مختلف بروز حوادث، با تعداد قابل قبولی از تجهیزات از مدار خراج شده و در زمان قابل قبول، به کارکرد خود بازگردد. این موضوع، به موضوعاتی نظیر امنیت، قابلیت‌اطمینان و ایمنی (Safety) نیز مربوط می‌شود [۱].

۲-۲- ویژگی‌ها و کارکردها

برای برآوردن نیازهای کیفی مذکور، ویژگی‌ها و کارکردهایی باید در سیستم قدرت برقرار باشند. یعنی چه کارهایی باید انجام شوند و در چه زمانی؟ نمونه این کارها به شرح زیر است [۱]:

- داشتن مقررات فنی برای پذیرش تعداد متنوعی از تجهیزات؛
- تحمل تغییرات تولید و بار با درنظر گرفتن عدم‌قطعیت این تغییرات؛
- قابلیت تنظیم فرکانس، ولتاژ و جریان توان و کنترل کیفیت عرضه برق؛
- رویت‌پذیری یا اینکه وسایل اندازه‌گیری و جمع‌آوری داده در حد کافی باشد که بتوان کارهای کنترلی را انجام داد؛
- کنترل‌پذیری و پایداری، یا کنترل شبکه و اجزای آن به‌نحوی که بهره‌برداری پایدار برقرار بماند؛
- کنترل و بهینه‌سازی عملکرد محلی و لحاظ شدن محدودیت‌های محلی؛
- هماهنگی کنترل محلی با کنترل سراسری؛
- تبادل خودکار داده‌ها در سیستم؛
- راهکارهای هماهنگی در سیستم و بین بخشها و نهادهای مختلف با توجه به مرزهای آنها؛
- ویژگی‌ها و کارکردهای متناظر با سرمایه‌گذاری، دارایی (Asset) یا اموال و مدیریت فرصت‌های اقتصادی و منافع مالی؛
- کارهای لازم برای تاب‌آوری، خود راه‌اندازی (Black-start)، برپایی‌مجدد (Restoration)، خودترمیمی (Self-healing) و حفظ و بهبود قابلیت‌اطمینان.

۲-۳- ساختارها و اجزا

پس از تعیین کارهای لازم، نوبت به این می‌رسد که این کارها را چه نهادها یا اجزایی باید انجام دهند و مرزها و تعاملات آنها چگونه باید باشد. البته، بازهم بیشتر ارتباط مفهومی بین کارها و اجزاء مطرح است و جزئیات در حدی که به تک تک المان‌های سیستم برسد مدنظر نیست [۵ و ۱۰]. از این دیدگاه، سیستم قدرت، شبکه‌ای از ساختارها یا اجزاء است. که منظور از ساختار، مفهوم‌هایی نظیر ساختار صنعتی، کنترلی، و مالی می‌باشد [۱]. همچنین، ساختارها و اجزاء در معماری شبکه را می‌توان بصورت بلوک‌هایی در یک دیاگرام بلوکی درنظر گرفت. منظور از یک بلوک، یک یا چند ساختار، المان، یا ویژگی است که بتوانند با هم یک گروه با مرزهای مشخص تشکیل دهند و از طریق ورودی و خروجی خود با بلوک‌های دیگر تعامل دارند [۵]. به‌عنوان معیارهای تشکیل بلوک‌ها، می توان موارد زیر را ذکر کرد [۱]:

- نقشی که در صنعت برق ایفا می‌شود: منظور داشتن عملکرد مشابه از دید صنعت برق برای اجزای موردنظر است. این گروه‌بندی، تقریباً به همان بخشهای تولید، انتقال، توزیع و خرده‌فروشی منجر می‌شود.
- مرزبندی‌های جغرافیایی یا مدیریتی: این تقسیم‌بندی برمبنای نواحی جغرافیایی یا قلمروهای مسئولیت یا مدیریت است که می‌تواند یک نقطه شروع مناسب باشد. مثلاً، در یک سیستم قدرت بزرگ، از قبل چند ناحیه تعریف شده باشد و یک اپراتور در هر ناحیه، مسئول بهره‌برداری و حفظ قابلیت‌اطمینان باشد. در یک ناحیه، همچنین می‌توان چند زیرناحیه درنظر گرفت که با رویه‌های کنترلی سازگار باشند.
- ساختار الکتریکی: در این گروه‌بندی، به موارد اتصال و تعامل الکتریکی اجزای شبکه پرداخته می‌شود. این موارد برای اجزای مورد نظر می‌تواند هم از دیدگاه کارکرد مفید و هم از دیدگاه کارکرد غیرعادی و یا مشکل‌دار باشد. مثلاً، اینکه ممکن است نصب تعداد زیادی از منابع تولید پراکنده در یک ناحیه از شبکه ضروری و مفید به‌نظر برسد اما درعین حال نفوذ زیاد این منابع مشکلاتی در شبکه ایجاد کند. مفهوم کلی جریان توان هم می‌تواند به‌عنوان یک بلاک از این دیدگاه معرفی شود.

- گروهی از اجزای با فعالیت مشابه: گروهی از مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی می‌توانند یک بلوک ساختمانی باشند. ممکن است این گروه، در آینده نچندان دور از حالت مصرف‌کننده صِرف (غیرفعال)، به مخلوطی از مصرف با قابلیت پاسخگویی و تولید محلی (فعال) تغییر وضعیت دهند. همچنین، تعدادی از تولیدکنندگان، می‌توانند بلوک ساختمانی فرض شوند به‌شرطیکه معیارهای مشخصی برای ادغام در یک گروه داشته باشند. ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی هم می‌تواند یک معیار برای گروه‌بندی قلمداد شود.
- ساختارهای جدید: نظیر شهرک هوشمند، تجمیع‌کننده و ریزشبکه، مثالهای دیگری برای معیارهای گروه‌بندی هستند.
- کارکردهای مالی، کسب‌وکار و عملیات بازار: این نوع گروه‌بندی از دید سرمایه‌گذاری و تعامل با جریان مالی بین اجزای سیستم است. منظور از جریان مالی، جریان پول بین اجزای مربوطه با توجه به نوع و کارکرد آنها است. اجزای اصلی در این‌خصوص، تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان هستند. بازارهای برق نیز می‌توانند در این مدل لحاظ گردند.
- قوانین یا فرآیندهای نظارت، کنترل و هماهنگی: منظور از این مورد، تعریف بلوک‌هایی است که امکان هماهنگی بین قوانین اجرایی و همچنین کنترلی را از منظر فراتر از نگرش محلی، فراهم کنند. چراکه هماهنگی کنترلی در سطح کلان، بخش مهمی از معماری شبکه است. همانطور که قبلاً ذکر شد، فرآیندهای کنترلی در تعداد قابل‌توجهی از اجزای سیستم قدرت مورد نیاز هستند و بخش مهمی از ارتباطات بین این اجزا را تشکیل می‌دهند و لذا باید در کل سیستم هماهنگ باشند. همچنین، این فرآیندها نقشی اساسی در مدیریت کسب و کار در سیستم قدرت و یا در مدیریت بازار برق دارند.
- محاسبات و شبیه‌سازی: کارهای مبتنی بر نرم‌افزار که ابزار کمک به مدیریت و کنترل هستند.
- مخابرات یا تبادل و مدیریت داده: در این معیار، ارتباط بین ساختارها و اجزاء، برمبنای تبادل داده بین آنها تعریف می‌شود.
- شبکه‌های خارج از سیستم قدرت: بخصوص شبکه سوخت‌رسانی که ارتباط متقابل با سیستم قدرت دارد.

نهایتاً در گروه‌بندی، به ویژگی‌های متمایز کننده توجه می شود تا سازماندهی و مرزها مشخص گردد. در هر مرز، کارکردهایی قرار می‌گیرند که موضوع، فلسفه یا مسئول مشابهی دارند [۲ و ۵]. گروه‌ها باید حتی‌الامکان تداخل کاری یا مسئولیت نداشته باشند، بتوانند بطور کمّی توصیف شوند و درصورت لزوم به آنها اولویت یا اهمیت اختصاص یابد.

۲-۴- نگاشت و نقشه‌های معماری

منظور از نگاشت (Mapping) در معماری شبکه، مرتبط کردن خروجی مراحل مختلف معماری با یکدیگر بوسیله کنار هم قراردادن نقشه‌های خروجی این مراحل است. شکل (۲)، یک نمونه از این کار را نشان می‌دهد. طی مراحل معماری، چنین نگاشتی برای این مفید است که مشخص شود ارتباط مناسب بین نیازها با کارکردها و با اجزاء، برقرار است یا نه؟ نگاشت، همچنین، امکان مقایسه و ارزیابی کمّی خروجی‌های معماری را فراهم می‌کند.

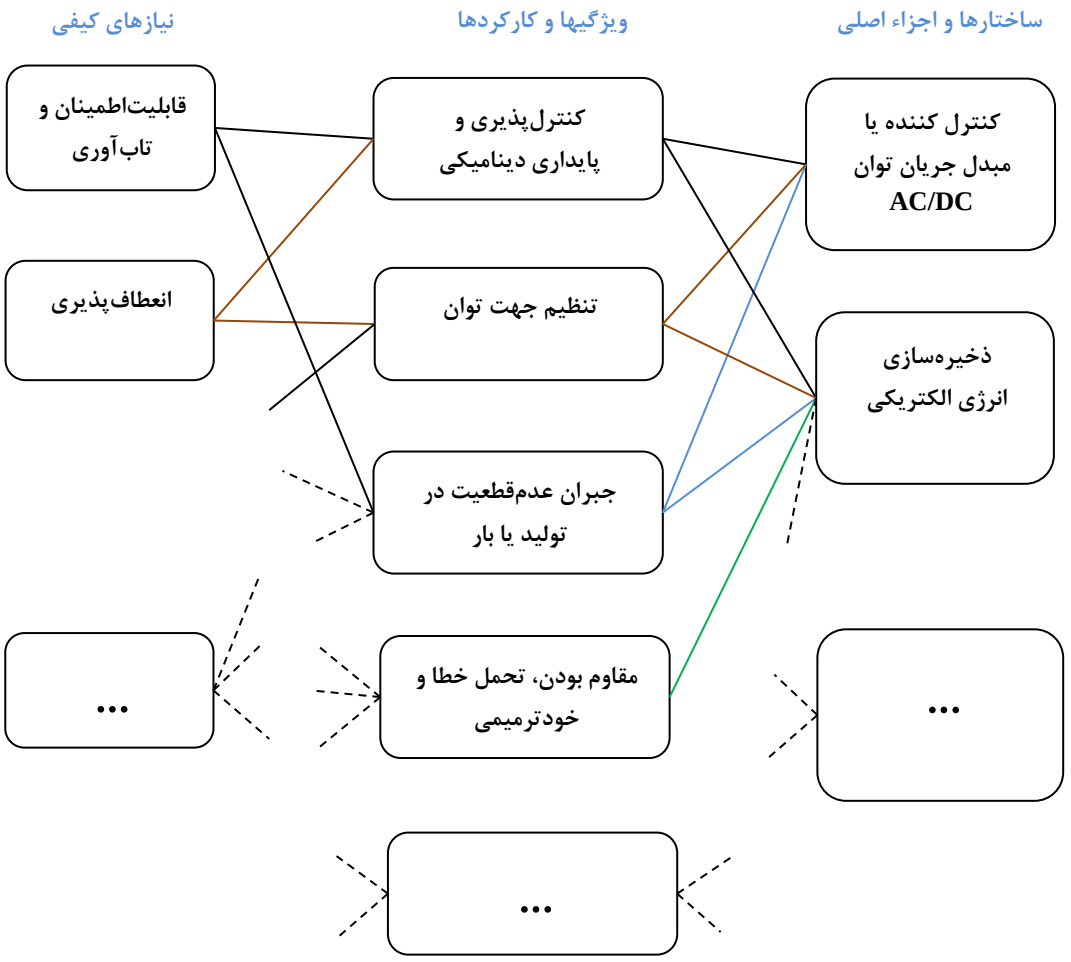
نقشه‌های معماری می‌توانند در یک مرحله یا بین چند مرحله برای تشخیص ناهماهنگی و ناسازگاری احتمالی، بکار روند. به‌عنوان نمونه، پس از اینکه در گروه‌بندی، مرزها یا بلوک‌ها رسم شدند، نقشه ارتباطات بین آنها قابل ارائه است. این نقشه، جنبه‌های مختلفی نظیر نظارت، کنترل، تنظیم و خرید و فروش را شامل می‌شود.

هر نقشه می‌تواند در کنار نقشه‌های دیگر قرار داده شود مثلاً، نقشه مبتنی بر بلوک‌های کنترلی در کنار نقشه‌های متناظر با بلوک‌های صنعتی و الکتریکی قرار گیرد. به‌عنوان مثال، شکل (۳) مجموعه‌ای از نقشه‌های معماری یک شبکه هوشمند را نشان می‌دهند. چنین نقشه‌هایی، تصویری از لایه‌های مختلف یک سیستم را ایجاد می‌نمایند [۵ و ۱۲]. استفاده از نقشه‌ها، علاوه بر کمک به هماهنگی، می‌تواند برای مشخص کردن اولویت‌های جدید، اصلاح اهداف، سیاست‌ها یا قانون‌گذاری‌ها و بهبود مسیر حرکت به سمت اهداف بکار رود.

۲-۵- ارزیابی و خروجی

در انتهای مراحل معماری شبکه، مرحله ارزیابی و سپس ارائه گزارش برمبنای خروجی‌های مورد نظر وجود دارد. دیاگرام‌های بلوکی و ساختار چند لایه مبتنی بر نقشه‌های معماری که در مراحل قبل معرفی شدند، برای ارزیابی قابل استفاده هستند. می‌توان لایه‌های مختلف در ساختار چند

لایه را با ابزارهای تحلیل کیفی یا کمّی مورد ارزیابی قرار داد و بررسی نمود که آیا مفاهیم مورد انتظار به درستی پیاده سازی شده است؟ ارتباط بین لایه‌ها، صحیح و کافی است؟ آیا شبیه‌سازی‌ها و آزمون‌ها در سناریوهای مختلف رضایت‌بخش است؟ و مواردی از این‌قبیل. مرجع [۱۳]، یک نمونه از تجربه ارزیابی معماری شبکه از دیدگاه مورد نظر را ذکر کرده است. نتایج ارزیابی می‌تواند به بازنگری، اولویت-ها، گروه‌ها و ساختارها منجر شود.



شکل ۲- نمونه ای از نگاشت در معماری [۱].

چند نرم‌افزار ارزیابی مهندسی سیستم هم بصورت تجاری موجود هستند که می‌توان به مرجع [۱۴] برای Systems modeling language و مرجع [۱۵] برای Power System Automation Language یا PSAL اشاره کرد. شکل (۴) یک نمونه از پیاده سازی مدل سیستم در نرم افزار دوم را نشان می‌دهد. اما این نرم‌افزارها، لزوماً با نیازمندی‌های سیستم‌های قدرت مختلف سازگار نیستند و باید توابع یا ابزارهای محاسباتی تکمیلی به آنها اضافه شود. همچنین، اگر بتوان مقادیر عددی به دیاگرام‌های بلوکی یا چند لایه‌ای اختصاص داد، امکان استفاده از ابزارهای ریاضی برای تحلیل فراهم می‌شود. مثلاً، روش‌های مبتنی بر نظریه گراف می‌توانند در چنین تحلیلی مورد استفاده قرار گیرند. البته بدون تحلیل ریاضی هم می‌توان از دیاگرام‌های مذکور برای ارزیابی ارتباط بین اجزای سیستم استفاده و تعیین کرد که مثلاً تأثیر یک المان بر نیاز کیفی موردنظر چیست [۱].

گزارش‌های حاصل از معماری، بیشتر به ارائه راهنمایی‌ها و خط‌مشی‌های کلی برای بهبود و توسعه سیستم می‌پردازد. مثلاً، نیازها چطور به نحو مطلوب برآورده شوند؟ پیکربندی سیستم چگونه باشد که با توجه به اهداف، قیدها و ارتباط اجزاء، وضعیت مطلوب را ایجاد کند؟

خروجی معماری شبکه، برای طراحی و توسعه شبکه نیز مفید است. چراکه، در ارزیابی، به فاصله بین کارکردهای موجود و کارکردهای مطلوب در آینده نیز توجه می‌شود.

یک مبنای چنین مقایسه‌ای، سیستم قدرت فعلی است که اقدامات مربوط به معماری شبکه روی آن اجرا نشده باشد [۲]. دراین‌خصوص، می‌توان یک لایه طراحی فنی هم به معماری اضافه کرد. البته اگر این کار در معماری انجام شود، بیشتر به نوع اجزا توجه می‌شود تا به مشخصاتی که آنها را به سازنده خاص مربوط کند [۵]. جنبه‌های فنی، در مرحله طراحی با جزئیاتی که از نتایج معماری قابل انجام است، مورد توجه قرار می‌گیرند.

نهایتاً، یک نکته که باید در ارزیابی اقتصادی معماری به آن توجه داشت، کاهش هزینه‌های سیستم ناشی از بهبود معماری است. چراکه بهبود معماری می‌تواند هزینه‌های پیشامدها و تعمیر و نگهداری را کمتر کند [۹].

برای خلاصه کردن این قسمت، می‌توان گفت که خروجی-های معماری می‌تواند در موارد زیر سودمند باشد [۱]:

- هماهنگی تغییرات در ساختار و طی توسعه و بهره‌برداری سیستم؛
- مدیریت بهتر پیچیدگی و ریسک؛
- تشخیص خلأهای موجود بین رویکردهای نظری و عملی؛
- تشخیص ابهامات در قوانین و مسئولیتها بخصوص برای توسعه شبکه؛
- توسعه تبادلات اطلاعاتی و مالی بین مالکان و سرمایه‌گذاران؛
- کاهش موانع ساختاری دربرابر پذیرش فن‌آوری‌های جدید و مدل‌های مالی.

۳- نمونه‌های معماری شبکه

در این قسمت، نمونه‌هایی از تعریف، طراحی یا الگو گرفتن از معماری شبکه، ذکر می‌گردد.

۳-۱- مدل SGAM

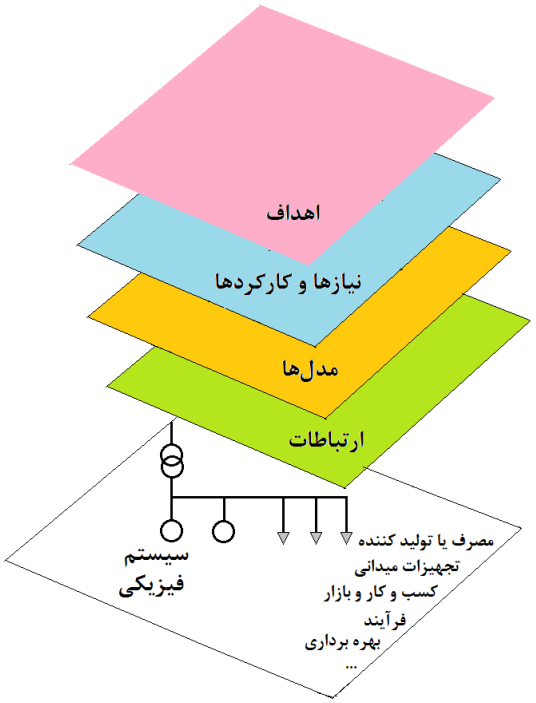
با توجه به افزایش بکارگیری شبکه‌های هوشمند طی سالهای اخیر در اتحادیه اروپا، مدلی به‌نام مدل معماری شبکه هوشمند (Smart-Grid Architecture Model) یا SGAM به‌عنوان یک مدل استاندارد معرفی شده است. این مدل، حاصل تلاش کشورهای اروپایی برای طراحی ازدیدگاه کلان و هماهنگی بهتر بین اجزای سیستم است. مدل مذکور می‌تواند برای طراحی، توسعه و ارزیابی راه‌حل‌ها یا فن‌آوری‌های جدید بکارگرفته شود [۱۶].

همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، SGAM یک نمایش فضایی شامل سه محور قلمرو (Domain)، ناحیه (Zone) و قابلیت همکاری (Interoperability) است [۵]. در این فضا، بخشهای سیستم و تعامل بین آنها، بسته به نیاز، تعریف و لحاظ می‌شوند. محور قلمرو، به مواردی اختصاص دارد که به تبدیل، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی در سیستم قدرت مربوط می‌شوند. محور ناحیه، موارد مرتبط با اطلاعات و تبادل آنها از دیدگاه کنترل تجهیزات را در بر می‌گیرد. در محورهای قلمرو و ناحیه، می‌توان از استانداردهای مرتبط نظیر IEC 61968 و IEC 91970 به‌عنوان معیار در تعریف معماری نیز کمک گرفت [۹]. برای لحاظ شدن تعامل بین اجزای سیستم، لازم است که در محور قابلیت همکاری، مواردی نظیر کسب و کار، کارکردها و مخابرات دیده شود.

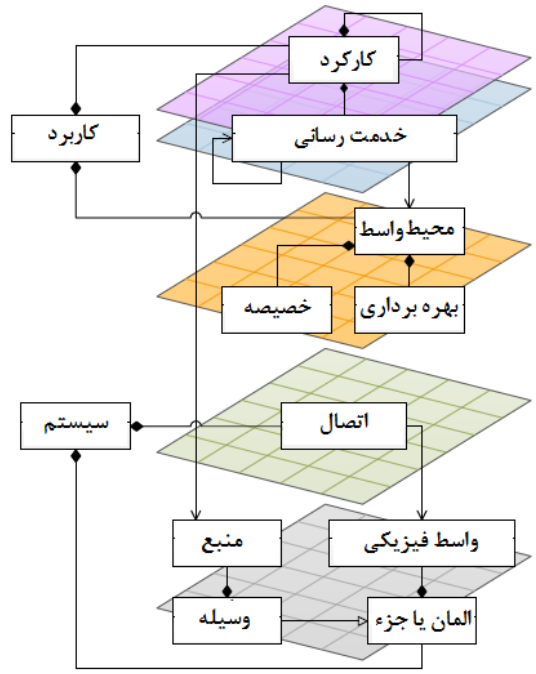
پروژه‌های مختلفی طی ۱۰ سال گذشته در اتحادیه اروپا اجزا شدند که با SGAM مرتبط هستند. ازجمله آنها می-توان به این موارد اشاره کرد: افزایش قابلیت‌های بهره‌برداری از شبکه توزیع برای بکارگیری ابزارهای جدید نظارت و کنترل؛ ایجاد بستر کنترلی لازم برای بکارگیری منابع تجدیدپذیر و بارهای قابل کنترل در مقیاس زیاد؛ پیاده‌سازی زیرساخت مورد نیاز برای بکارگیری مدیریت مصرف؛ ایجاد خدمات انعطاف‌پذیر در بازار برق و امکان مشارکت مصرف‌کنندگان در بازار؛ هماهنگی بین بهره‌برداران شبکه‌های انتقال و توزیع در بکارگیری ابزارهای مدیریت شبکه (که شکل ۶ ساختار چند لایه و شکل ۷ نمونه تبادل اطلاعات بین مراکز مرتبط را نشان می‌دهد) و اتوماسیون صنعتی در کارخانجات [۵].

۳-۲- معماری ایجاد شبکه هوشمند

در [۹]، یک الگوی معماری برای کل سیستم قدرت مشابه شکل (۳) ارائه شده است که بتواند به ایجاد شبکه هوشمند در این سیستم کمک کند. در بحث هوشمندسازی، تأکید بر اتوماسیون فرآیندهای مختلف است. مدل پیشنهادی، نظیر SGAM دارای تقسیم‌بندی برمبنای "قلمرو" می‌باشد. هر قلمرو، شامل چند لایه است. از جمله لایه‌ها می‌توان به لایه بهره‌برداری از دید داده‌های مورد نیاز و تبادل آنها، کارکرد نیروگاه‌ها با هم، مدیریت شبکه‌های انتقال و توزیع و خدمات مشترک بین اجزای سیستم (نظیر مدیریت فرآیندهای اقتصادی مرتبط با کسب و کار) و مدیریت دارایی و مخابرات بین تمام بخشهای کلان سیستم،



شکل ۳ - مدل معماری یک شبکه هوشمند [۵ و ۱۲].

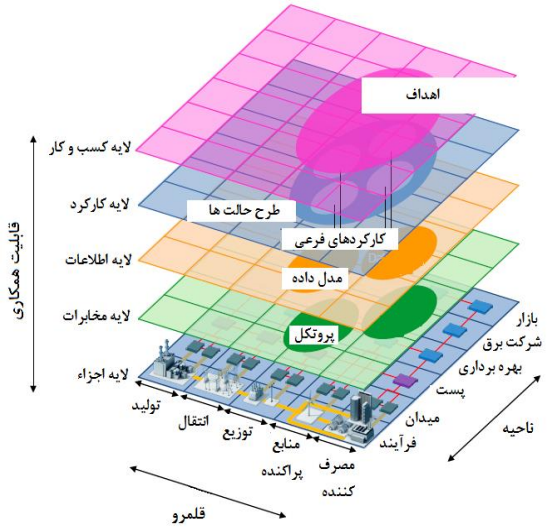


شکل ۴ – نمونه پیاده‌سازی در PSAL [۵].

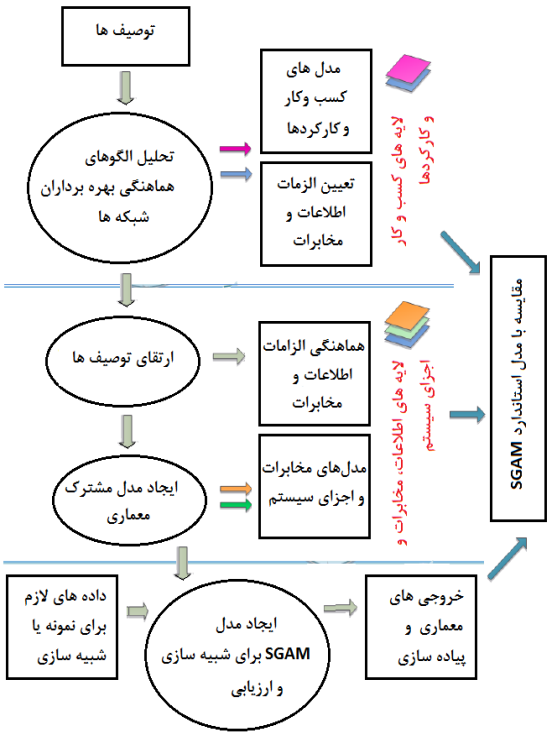
اشاره کرد. به هر لایه، اتوماسیون و کنترل مربوط به خود اختصاص می‌یابد.

۳-۳- معماری سیستم کنترل

در مرجع [۱۱]، طراحی معماری، برای زیرسیستم کنترل فرکانس از طریق کنترل واحدهای تولید، انجام شده است. این بخش، در ساختار مفهومی و کارکرد، شامل چند بلوک و جریان داده بین بلوک‌ها است. برای بلوک‌های بکار رفته می‌توان به این موارد اشاره کرد: بلوک مرکز کنترل فرکانس، که ضمن دریافت داده از بلوک‌های واحدهای تولید و بلوک-های پست‌های واقع در شبکه انتقال، به واحدهای تولید، فرمان تنظیم خروجی ارسال می‌کند.



شکل ۵ – طرح کلی SGAM [۵].



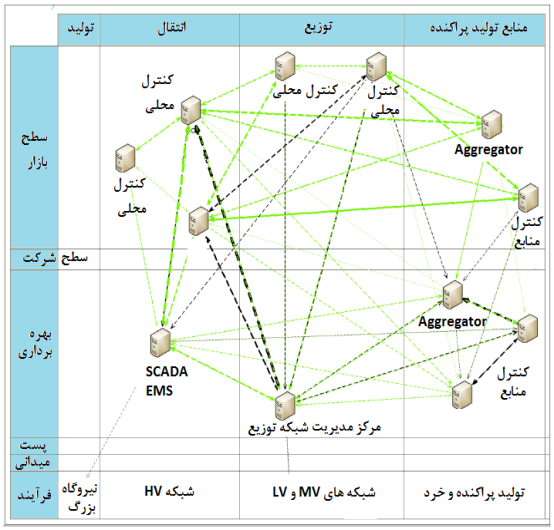
شکل ۶ – فرآیند طراحی و تحلیل لحاظ کردن الزامات اطاعاتی و مخابراتی برای هماهنگی بین بهره‌برداران شبکه‌های انتقال و توزیع [۵].

این ساختار بلوکی، به ساختار سلسله مراتبی تقسیم می‌شود که در آن اولویت‌های کنترلی لحاظ می‌گردد. به‌عنوان

نمونه، کنترل فرکانس بین ناحیه‌ای در بالاترین اولویت و کنترل فرکانس در یک ناحیه و واحدهای تولید آن در اولویت‌های بعدی هستند. نهایتاً، ساختار سلسله مراتبی، امکان تفکیک به ساختار چند لایه را فراهم می‌کند. در ساختار چند لایه، فرآیندهای کنترلی مرتبط با هر لایه را می‌توان معرفی کرد. مثلاً، کنترل واحدهای تولید برمبنای مشخصه فرکانس-توان آنها.

۴- نکات و چالش‌های معماری شبکه

یک معماری مناسب، باید مفهوم یکپارچگی سیستم را حفظ و به توسعه هماهنگ و اقتصادی سیستم در زمان‌بندی واقع‌بینانه کمک کند. برای مناسب بودن معماری، لازم است به نکات یا مواردی توجه شود که بعضاً با هم در تعارض هستند و می‌توانند باعث بروز چالش‌های اجرایی شوند. این قسمت، به ذکر پاره‌ای از این نکات می‌پردازد [۱ و ۲].



شکل ۷ – لایه مخابرات طبق مدل SGAM که در آن مخابرات بی‌سیم و باسیم به‌ترتیب با مسیرهای سبز و سیاه نشان داده شده است [۵].

۱) پرهیز از جزئیات و ذکر روش‌ها یا گزینه‌های خاص: معماری شبکه باید با سیاست‌گذاری‌ها و دید کلان، همراستا باشد. به‌همین دلیل، کارکرد درونی یک جزء یا المان مورد توجه معماری نیست؛ اینکه چه کاری را در چه زمانی باید انجام داد مدنظر است نه اینکه چه کسی و چگونه این کار را انجام می‌دهد. پس نباید انتظار داشت که معماری شبکه، گزینه‌های فن‌آوری را پیشنهاد دهد.

همچنین، معماری به مطالعه جزئیات وضعیت موجود یا وضعیت آینده سیستم نمی‌پردازد. برای پرهیز از مطالعات با جزئیات، می‌توان از فرضیات و تجربیات فعلی و آتی که در سیستم قدرت بکار می‌روند، کمک گرفت.

۲) در تعیین ساختارها و گروه‌ها، تأکید بر نیازمندی‌ها است و نه سلایق افرادی که معماری را انجام می‌دهند. این افراد، بیشتر باید به‌دنبال مشخص کردن اجزای یک سیستم یکپارچه و نحوه تعامل بین آنها باشند. ضمن اینکه، در گروه‌بندی، باید بین اینکه ساختار سیستم قدرت بصورت یکپارچه عموی (Vertically integrated) یا بصورت بازار عمده‌فروشی تحت مدیریت اپراتور مستقل سیستم یا ISO باشد، تمایز قائل شد. همچنین، یک چالش گروه‌بندی، احتمال تغییر مرزهای گروه‌های فعلی است که بتواند جوابگوی نیازهای آتی سیستم باشد.

۳) از مطالعات بین‌المللی می‌توان به‌عنوان شواهد و مدارک پژوهشی و عملی برای معماری شبکه کمک گرفت. مثلاً، بررسی‌ها نشان می‌دهد بیشتر موارد اصلی، در مطالعات معماری کشورهایی نظیر آمریکا، انگلیس، آلمان، ایرلند و کره‌جنوبی مشابه هستند. هرچند شدت و ضعف ملاحظات آنها متفاوت است [۲]. همچنین، نمونه‌های عملی در سایر کشورها می‌تواند به‌عنوان الگو مورد توجه قرار گیرد. البته، یک نمونه عملی، وقتی قابل استناد است که شواهد و مدارک مربوط به آن معتبر یا کافی باشد. یک روش دیگر برای جمع‌آوری اطلاعات اولیه که در [۲] پیشنهاد شده، ارسال پرسش‌نامه برای نهادهای اصلی و تحلیل پاسخ‌های آنها است. مثلاً پرسیده شود نیازهای آتی آنها با توجه به ورود فن‌آوری‌های جدید در سیستم قدرت چیست؟ آیا شواهدی از اجرای نیازهای خود دارند؟ و ...

۴) مدل معماری، قوانین و الگوریتم‌های کنترلی را مشخص نمی‌کند، بلکه تعامل کنترلی بین گروه‌های مربوط به اجزای سیستم را ترسیم می‌کند. به بیان دیگر، چهارچوبی مشخص می‌شود که فرآیندهای کنترلی را پشتیبانی نماید. دراین-خصوص، تقریباً پذیرفته شده است که لحاظ کردن ترکیبی از کنترل‌های محلی و سراسری (یا متمرکز و گسترده) در سیستم‌های قدرت آتی ضروری است. در چنین چهارچوبی، شبکه‌ای از گره‌ها و شاخه‌های کنترلی وجود دارد. هر گره یک جنبه از یک مسأله بزرگتر را برای یک ناحیه محلی حل می‌کند. شاخه‌ها تبادل داده و هماهنگی بین گره‌ها را نشان می‌دهند. این اجزاء، در نهایت به کنترل مسأله موردنظر از بالادست منجر می‌شوند. در این چهارچوب، می‌توان سطوح مختلفی تعریف کرد که گره‌های با کارکرد مشابه در یک سطح باشند. لذا، روند سلسله مراتبی را می‌توان حفظ کرد.

۵) لازم است که کارکردها، طبق مقیاس زمانی بکارگیری آنها تقسیم‌بندی شوند. به‌عنوان نمونه برای این تقسیم‌بندی می‌توان به مرحله سرمایه‌گذاری و توسعه، مرحله برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری، مرحله توازن توان در زمان واقعی و مرحله تسویه بازار برق، اشاره کرد. ممکن است یک کارکرد در بیشتر از یک تقسیم‌بندی زمانی ظاهر شود. هرچند تشابهاتی وجود دارد اما بودن یک کارکرد در دو تقسیم‌بندی زمانی به‌معنی تفاوت در الزامات فنی و مسئولیت‌ها است. می‌توان یک جدول زمانی تهیه کرد که نشان دهد چه کاری از معماری در چه زمانی باید تکمیل شده باشد.

۶) یک چالش سیستم‌های قدرت آینده، اضافه شدن تعداد قابل توجه وسایل جدید در شبکه توزیع است. مثلاً اینکه میلیون‌ها کنتور هوشمند نصب شوند تا امکان پاسخ تقاضا به تغییرات قیمت را فراهم کنند. این تعداد زیاد وسایل، نیازمند زیرساخت مخابراتی پرظرفیت است. همچنین، پاسخ تعداد زیادی از مصرف‌کنندگان به تغییرات قیمت، می تواند به تغییرات پردامنه ولتاژ و فرکانس منجر شود که نیاز به کنترل مجدد دارد. نکته دیگر این است که افزایش انعطاف‌پذیری برای پذیرش وسایل جدید نباید به کاهش امنیت سیستم منجر شود.

۷) این احتمال وجود دارد که به روش‌های جدید انعقاد قرارداد و تسویه بازار نیاز پیدا شود که در آنها بهبود ارزش مالی، شفافیت داده‌ها و رضایت نهادهای مشارکت کننده لحاظ شده باشد. روش‌های جدید بازار، می‌تواند مزیت مالی برای تولیدکنندگان و گزینه‌های بیشتر عرضه برق برای مصرف‌کنندگان فراهم کند. البته، با چالش‌های تعیین نوع، میزان و زمان‌بندی مقرارت فنی و سازوکار مالی و تخصیص هزینه و درآمد، روبرو خواهند بود. همچنین، نیازمند ارتقای زیرساخت‌های اقتصادی و مخابراتی است. باید توجه داشت که با افزایش سطح معاملات مربوطه، هماهنگی با سیستم قدرت بالادست حیاتی می‌شود، چراکه حجم زیاد معاملات، می‌تواند جریان‌های عادی توان در سیستم را دچار اختلال کند.

۸) به‌دلیل ابعاد بزرگ سیستم قدرت و عدم‌قطعیت‌هایی که در اثر رویکردها و فن‌آوری‌های جدید یا ایده‌های معماری ایجاد می‌شوند، روش‌های پیش‌بینی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی، هنوز جای کار دارند. مثلاً، پیش‌بینی بار، با وجود مصرف‌کنندگانی که به قیمت پاسخ می‌دهند، یا برای مصرف‌کنندگانی که با الگوی زمان‌مصرف (Time of Use) کار می‌کنند، چه وضعیتی خواهد داشت؟ مثال دیگر، نیاز به کارآمدتر شدن تحلیل‌های احتمالاتی و مبتنی بر عدم‌قطعیت است.

۹) بعضی محققین، پیشنهاد می‌کنند که اپراتور سیستم توزیع به بخش توزیع سیستم قدرت اضافه شود. این اپراتور، کارکردی مشابه اپراتور شبکه انتقال دارد [۱]. نقش اپراتور سیستم توزیع، مدیریت شبکه توزیع، حفظ قابلیت‌اطمینان در آن و تعامل با سیستم قدرت بالادست است. درصورت وجود اپراتور سیستم، می‌توان یک بلوک ساختاری برای آن درنظر گرفت که شامل ویژگی‌های اجزای تحت مدیریت اپراتور می‌باشد. همچنین نحوه تعامل اپراتور شبکه توزیع با اپراتور شبکه انتقال می‌تواند در مدل کنترلی مشخص گردد. تعریف اپراتور شبکه توزیع یکی از مباحث چالش‌برانگیز است، چراکه می‌تواند تغییرات جدی در روش‌های مدیریت شبکه ایجاد کند.

۱۰) نهایتاً، یادآوری می‌شود که اگر معماری شبکه مورد توجه قرار نگیرد، ریسک موارد زیر افزایش می‌یابد [۱، ۲ و ۴]:

- افزایش مشکلات پیش‌بینی نشده؛
- تضعیف یکپارچگی و قابلیت‌اطمینان شبکه؛
- صرف هزینه‌های زیاد و غیربهینه برای حل مشکلات؛
- کاهش بهره‌وری سرمایه‌گذاری و ضعف در مدیریت دارایی؛
- مشکل در بکارگیری فن‌آوری‌های جدید؛
- افزایش عدم‌هماهنگی و تعارض در سیاست‌گذاری‌ها، توسعه و بهره‌برداری؛
- ناکامی در رسیدن به اهداف موردنظر.

۵-نتیجه گیری

در این مقاله، به بیان کلی مبحث معماری شبکه، مفاهیم، مراحل و نکات مربوطه پرداخته شد. این مبحث، می‌تواند یک دید کلان از سیستم قدرت و یک نقشه راه برای حل مشکلات آن ارائه دهد.

این مشکلات، ناشی از ابعاد، پیچیدگی، ناهماهنگی و نیازهای آتی سیستم است. معمولاً چنین توصیه می‌شود که محققین و دست‌اندرکاران صنعت برق، ایده‌ها، نتایج و شواهد مربوط به معماری شبکه را با توجه به واقعیت‌های

سیستم قدرت خود بکار گیرند. در این‌خصوص، صرف وقت و دقت در رسیدن به دید کلان و مناسب از سیستم، سیاست‌گذاری‌ها و اهداف، خدمات مورد انتظار و وضعیت آینده سیستم، می‌تواند اجرای معماری را تسهیل کند. ضمن اینکه نتایج حاصل از آن واقع‌بینانه و مفیدتر خواهند بود.

مراجع

[1] Pacific Northwest National Laboratory, Grid architecture, Report Prepared for the U.S. Department of Energy, November 2014.

[2] IET, Future power system architecture, A report commissioned by the Department of Energy and Climate Change, Part 2, 2016.

[3] P. Nardelli, N. Rubido, C. Wang, M. S. Baptista, C. P. Raez, P. Cardieri, and M. L. Aho, “Models for the modern power grid”, The European Physical Journal Special Topics, Vol. 223, No. 12, 2014, pp. 2423–2437.

[4] M. Knight, D. Houseman and L. Macintosh, “Grid architecture, crossing the chasm between concept and implementation”, White paper, www.1898&co.com, 2019, pp. 1-4.

[5] M. Uslar, S. Rohjans, C. Neureiter, Ch. Neureiter, F. P. Andern, J. Velasquez, C. Steinbrink, V. Efthymiou, G. Migliavacca, S. Horsmanheimo, H. Brunner, and T. I. Strasser, “Applying the smart grid architecture model for designing and validating system-of-systems in the power and energy domain: a European perspective”, Energies, Vol. 12, 2019.

[۶] محمد علیزاده میثم جعفری نوکندی و یامین سلطان مرادی، "مدلسازی و بهینه سازی مصرف انرژی در خانه هوشمند با حضور ذخیره‌ساز انرژی، سلول خورشیدی، خودروی برقی و پاسخ‌گویی بار"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۷، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۲۱۵-۲۲۶.

[۷] قاسم میربابایی رکنی، مسعود رادمهر و علیرضا ذکریازاده، "مدلسازی مدیریت منابع انرژی پراکنده در ریزشبکه با استفاده از روش توزیع شده"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۷، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۲۴۱-۲۵۲.

[۸] حمید فلقی مریم رمضانی و محمودرضا حقی‌فام، "تحلیل تأثیر نیروگاه‌های بادی بر قابلیت تبادل شبکه‌های انتقال در سیستم قدرت"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۰، شماره ۳۰، پاییز ۱۳۹۱، صفحه ۶۱-۷۵.

[9] I. Parra, A. Rodriguez and G. Arroyo-Figueroa, “Electric utility enterprise architecture to support the smart grid- enterprise architecture for the smart grid”, IEEE International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), Sept. 2014, Vienna, Austria.

[10] https://gridarchitecture.pnnl.gov/media

[11] K. Heussen, A. Saleem and M. Lind, “Control architecture of power systems: modeling of purpose and function”, IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 2009, Calgary, Canada.

[12] F. Wenderoth, E. Drayer, R. Schmoll, M. Niedermeier, M. Braun, “Architectural and functional classification of smart grid solutions”, Energy Informatics,Vol. 2, No. 33, 2019.

[13] A. A. Van der Meer, P. Palensky, K. Heussen, D. E. Morales Bondy, O. Gehrke, C. Steinbrinki, M. Blanki, S. Lehnhoff, E. Widl, C. Moyo, T. I. Strasser, V. H. Nguyen, N. Akroud, M. H. Syed, A. Emhemed, S. Rohjans, R. Brandi, and A. M. Khavari, “Cyber-physical energy systems modeling, test specification, and co-simulation based testing”, Proceedigns of the Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES), April 2017, Pittsburgh, USA.

[14] https://www.omg.org/spec/SysML/About-SysML

[15] F. Prostl Andren, T. Strasser and W. Kastner, “Engineering smart grids: applying model-driven development from use case design to deployment”, Energies, Vol. 10, No. 3, 2017.

[16] M. Gottschalk, M. Uslar and C. Delfs, “The use case and smart grid architecture model approach”, Springer, 2017, pp. 41-61.