



برونداد تخصصی گروه پژوهشی الکترونیک قدرت

پژوهشگاه نیرو، پژوهشکده انتقال و توزیع

شماره ۱۰ - تابستان ۱۴۰۵



SUNVERTER



DC-DC CONVERTERS



LED DRIVER



اینورترهای هیبرید خورشیدی در آستانه یک جهش فناوری:

از مبدل برق تا "مدیر هوشمند انرژی"



اینورترهای خورشیدی که تا چند سال پیش عمدتاً وظیفه تبدیل برق DC پنل‌های خورشیدی به AC و تزریق آن به شبکه را بر عهده داشتند، اکنون در نسل جدید سیستم‌های هیبرید خورشیدی-ذخیره‌ساز به مرکز مدیریت انرژی ساختمان، باتری، شبکه و حتی شارژر خودرو برقی تبدیل شده‌اند.



بزرگ‌تر شدن بازار و مرحله جدید رقابت

بر اساس داده‌های Wood Mackenzie،

عرضه به بازار اینورترهای PV در جهان از ۵۳۶ گیگاوات

در سال ۲۰۲۳ به ۵۸۹ گیگاوات در سال ۲۰۲۴ رسیده است که

رشدی حدود ۱۰ درصدی را نشان می‌دهد. در همان سال، Huawei و

Sungrow در مجموع حدود ۵۵ درصد بازار جهانی اینورتر را در اختیار داشتند و

منطقه آسیا-اقیانوسیه ۶۹ درصد کل ظرفیت عرضه به بازار را به خود اختصاص داد.

با این حال، Wood Mackenzie برای کل بازار اینورتر PV کاهش عرضه به بازار به حدود ۵۷۷ گیگاوات

در ۲۰۲۵ و ۵۲۳ گیگاوات در ۲۰۲۶ را پیش‌بینی کرده است. این کاهش بیش از آنکه نشانه عقب‌نشینی فناوری

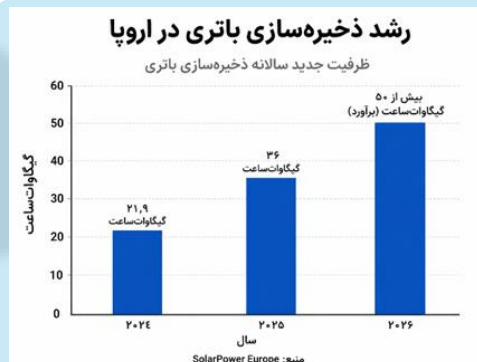
باشد، نتیجه اشباع موجودی، فشار قیمت‌ها و تغییر شرایط بازارهای چین، اروپا و آمریکا ارزیابی

می‌شود. در مقابل، تحلیل S&P Global برای سال ۲۰۲۵ از رکوردشکنی عرضه به بازار

اینورترهای هیبرید خبر داده و اعلام کرده است که کاهش جذابیت فروش برق به شبکه

و افزایش گرایش به خودمصرفی، اینورتر هیبرید را به گزینه اصلی بسیاری

از سیستم‌های مسکونی تبدیل کرده است.



The smarter E Europe 2026 در نمایشگاه Deye نسل ششم اینورترهای هیبرید مسکونی SG06 را معرفی کرد که برای نخستین بار در این سری از قطعات قدرت SiC استفاده می‌کنند. این شرکت اعلام کرده است این تغییر در کنار طراحی مجدد مدار و ساختار، ابعاد و وزن دستگاه را کاهش داده است.

SMA نیز در مبدل باتری Sunny Central Storage UP-S از ترانزیستورهای قدرت مبتنی بر SiC استفاده کرده و راندمانی بیش از ۹۹/۲ درصد را گزارش می‌کند. این نمونه‌ها نشان می‌دهند فناوری SiC، به دلیل کاهش تلفات و امکان افزایش چگالی توان، به تدریج در حال تبدیل شدن به یکی از فناوری‌های مهم نسل جدید اینورترها و مبدل‌های ذخیره‌ساز انرژی است.

گسترش دامنه کاربرد اینورترهای هیبرید

روند دوم، افزایش توان و گسترش دامنه کاربرد اینورترهای هیبرید است. این تجهیزات که در نسل‌های اولیه عمدتاً برای سامانه‌های خانگی چندکیلوواتی عرضه می‌شدند، اکنون به محدوده ساختمان‌های بزرگ و کاربردهای تجاری و صنعتی وارد شده‌اند؛ به‌طوری‌که خانواده‌های جدیدی مانند Sungrow SH15/20/25T، مدل‌های تجاری Solis و اینورترهای هیبرید پرتوان Deye، بازه‌ای از چند ده کیلووات تا حدود ۱۲۵ کیلووات را پوشش می‌دهند.

1 Grid-Forming

هم‌زمان، ذخیره‌سازها نیز با سرعت در حال گسترش هستند. SolarPower Europe گزارش داده است که در سال ۲۰۲۵ حدود ۳۶ گیگاوات‌ساعت ظرفیت باتری جدید در اروپا نصب شده که این مقدار ۴۸ درصد بیشتر از سال قبل بوده است. مجموع ظرفیت عملیاتی ذخیره‌سازی باتری اروپا نیز برای نخستین بار از ۱۰۰ گیگاوات‌ساعت عبور کرد و انتظار می‌رود نصب سالانه در سال ۲۰۲۶ از ۵۰ گیگاوات‌ساعت فراتر رود. این روند مستقیماً بازار اینورترهای هیبرید و PCS‌های دوطرفه را تقویت می‌کند. بررسی محصولات و فناوری‌های معرفی‌شده در سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۲۶ نشان می‌دهد که چهار روند بیش از سایر موارد آینده این صنعت را شکل می‌دهند. استفاده از نیمه‌هادی‌های سیلیکن کارباید، افزایش توان و ولتاژ سیستم‌های هیبرید، توسعه قابلیت شبکه‌ساز^۱ و ورود هوش مصنوعی و سامانه‌های مدیریت انرژی به داخل اینورتر.

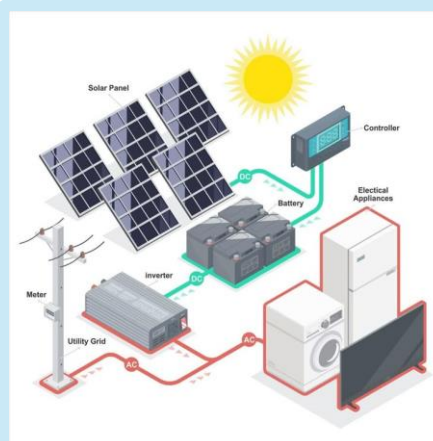
نسل جدید کلیدهای قدرت اینورترهای هیبرید

یکی از واضح‌ترین تحولات سال ۲۰۲۶، حرکت سازندگان از نیمه‌هادی‌های سیلیکونی متعارف به Silicon Carbide یا SiC است. این فناوری امکان کار در فرکانس سوئیچینگ بالاتر، تلفات کمتر، دمای کاری بالاتر و در نتیجه ساخت اینورترهای کوچک‌تر و با چگالی توان بیشتر را فراهم می‌کند.

تغییر استراتژی اینورتر از پیرو شبکه به سازنده شبکه

شاید مهم‌ترین تغییر فنی نسل جدید، حرکت از ساختار پیرو^۲ شبکه به ساختار شبکه ساز باشد. اینورترهای مرسوم برای کارکرد صحیح، ولتاژ و فرکانس شبکه را دنبال می‌کنند. اما یک اینورتر شبکه‌ساز می‌تواند خود مرجع ولتاژ و فرکانس ایجاد کند و در شبکه‌های ضعیف، میکروگریدها و شرایط جزیره‌ای نقش بسیار فعال‌تری داشته باشد.

این قابلیت در سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۲۶ از حوزه تحقیقاتی وارد محصولات تجاری شده است. SMA نخستین گواهی واحد آلمان برای یک اینورتر باتری شبکه‌ساز با قابلیت تامین ذخیره آنی را دریافت کرد و Huawei نیز در پلتفرم FusionSolar 9.0 قابلیت‌هایی مانند اینرسی مجازی، پاسخ سریع فرکانسی، پشتیبانی ولتاژ، راه‌اندازی از حالت خاموش و انتقال بین حالت متصل و منفصل از شبکه را به معماری جدید خود افزوده است. به این ترتیب، نسل آینده اینورترهای هیبرید صرفاً تابع شرایط شبکه نیست، بلکه می‌تواند بخشی از وظایفی را که پیش‌تر توسط ژنراتورهای سنکرون انجام می‌شد، به‌صورت الکترونیکی بر عهده بگیرد.



روند	شرح کوتاه	نمونه/خانواده محصول	اهمیت
استفاده از Sic	کاهش تلفات، افزایش چگالی توان و کوچکتر شدن تجهیزات	Deye SG06/SMA Sunny Central Storage UP-S	افزایش راندمان و کاهش ابعاد
افزایش توان سیستم- های هیبریدی	عبور از سامانه‌های خانگی به کاربردهای تجاری و صنعتی	Sungrow SH15/20/25T/Solis/Deye	گسترش دامنه کاربرد
قابلیت شبکه‌ساز	ایجاد مرجع ولتاژ و فرکانس در شرایط جزیره‌ای و شبکه ضعیف	Huawei FusionSolar 9.0/ SMA	افزایش پایداری و انعطاف پذیری
مدیریت هوشمند انرژی	همانگی خورشید، باتری، بار و شارژ خودرو برقی	Deye Integrated PV+Battery + EV charging	بهینه‌سازی خود مصرفی و پاسخ به تعرفه پویا

تبدیل شدن اینورتر به هاب انرژی

روند چهارم، انتقال بخش مهمی از ارزش اینورتر از سخت‌افزار قدرت به نرم‌افزار و مدیریت انرژی است. نسل جدید اینورترها قادرند هم‌زمان تولید خورشیدی، SOC باتری، بار ساختمان، قیمت لحظه‌ای برق و محدودیت تزریق به شبکه را مدیریت کنند.

S&P Global پیش‌بینی کرده است با گسترش تعرفه‌های پویا و نیروگاه‌های مجازی، سامانه‌های ذخیره‌ساز خانگی و تجاری با توجه به قیمت برق و شرایط شبکه، بتوانند زمان شارژ و دشارژ باتری را به‌صورت خودکار مدیریت کنند. محصولات ۲۰۲۶ حتی به سمت یکپارچه‌سازی سامانه خورشیدی، ذخیره‌ساز باتری و شارژ خودرو برقی حرکت کرده‌اند.

Deye از یک سامانه تجاری یکپارچه خورشیدی، ذخیره‌ساز و

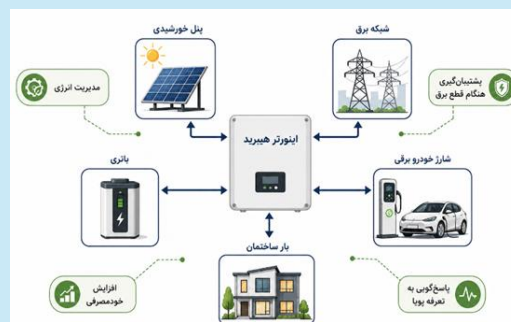
شارژ خودرو برقی رونمایی کرده است. نشانه‌ای از

اینکه مرز میان اینورتر خورشیدی، شارژر،

منبع تغذیه بی‌وقفه و سیستم مدیریت

انرژی به‌تدریج در حال محو شدن

است.



برگزاری نشست تخصصی: نشست نهایی تدوین دستورالعمل الزامات

و مشخصات فنی بکارگیری اینورترهای هیبریدی در

نیروگاه‌های فتوولتایک پشت بامی



ششمین و آخرین جلسه کمیته

تدوین دستورالعمل فنی بکارگیری

اینورترهای هیبریدی در نیروگاه‌های خورشیدی

پشت‌بامی، با همکاری پژوهشگاه نیرو، سازمان ساتبا،

انجمن‌های تخصصی صنعت برق و جمعی از شرکت‌های

توزیع نیروی برق، در محل پژوهشگاه نیرو برگزار شد.

این نشست توسط گروه الکترونیک قدرت پژوهشگاه انتقال و توزیع و

با حضور نمایندگان وزارت نیرو، شرکت‌های مادر تخصصی توانیر، گروه مپنا،

شرکت‌های توزیع نیروی برق استان‌های تهران، البرز و خراسان رضوی، انجمن

ساتکا، انجمن انرژی‌های تجدیدپذیر ایران، سندیکای صنعت برق، دانشگاه‌های

صنعتی شاهد و شهید بهشتی و پژوهشگاه نیرو برگزار گردید.



علی‌رغم رشد روزافزون استقبال از سامانه‌های خورشیدی پشت‌بامی در بخش خانگی و صنایع کوچک، تاکنون دستورالعمل فنی مشخص و یکپارچه‌ای برای الزامات بهره‌برداری ایمن اینورترهای هیبریدی وجود نداشته است. اینورترهای هیبریدی به عنوان قلب تپنده این سامانه‌ها، با قابلیت مدیریت هوشمند جریان انرژی بین پنل‌های خورشیدی، باتری‌ها و شبکه سراسری، مزایای بی‌نظیری از جمله افزایش تاب‌آوری مشترکین در برابر قطعی برق، کاهش هزینه‌های انرژی، ذخیره‌سازی انرژی مازاد برای مصرف در ساعات پیک و امکان فروش برق به شبکه را فراهم می‌کنند. توسعه این فناوری در مقیاس کوچک، گامی مؤثر در جهت توانمندسازی مصرف‌کنندگان و تحقق تولید پراکنده پایدار محسوب می‌شود. در این نشست تخصصی مباحث کلیدی پیرامون الزامات فنی، حفاظت‌ها، استانداردهای تجهیزات، نحوه نصب و اجرا، محدوده توان مجاز و شفاف‌سازی مرز میان این دستورالعمل با سایر اسناد مرتبط مورد بررسی و تبادل نظر قرار گرفت. با توجه به رشد چشمگیر استقبال از سامانه‌های خورشیدی پشت‌بامی و ذخیره‌سازها، تدوین و ابلاغ این دستورالعمل را می‌توان گامی مؤثر در جهت استانداردسازی، افزایش ایمنی، شفاف‌سازی نقش‌ها و مسئولیت‌ها و تسهیل اتصال ایمن اینورترهای هیبریدی به شبکه توزیع نیروی برق کشور دانست؛ اقدامی که زمینه‌ساز توسعه پایدار انرژی‌های تجدیدپذیر خورشیدی در بخش خانگی و تجاری خواهد بود.

ژنراتور استاتیک توان راکتیو در چین راهکاری برای افزایش بهره‌وری

با توجه به تحولات مستمر در بخش انرژی چین، تقاضا برای راهکارهایی که بتوانند پایداری و قابلیت اطمینان شبکه برق را حفظ کنند، به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. یکی از فناوری‌هایی که در این زمینه توجه بسیاری را به خود جلب کرده، ژنراتور استاتیک توان راکتیو است. این فناوری با هدف جبران‌سازی سریع و دقیق توان راکتیو و بهبود شرایط بهره‌برداری شبکه‌به کار گرفته می‌شود. نفوذ فزاینده منابع انرژی تجدیدپذیر و نوسانات قابل توجه بار سبب شده است تا نیاز به راهکارهای هوشمند مدیریت و جبران‌سازی توان راکتیو بیش از پیش احساس شود.

با وجود این مزایای بالقوه آن، از جمله بهبود کیفیت توان، افزایش پایداری شبکه و ارتقای بهره‌وری بهره‌برداری، نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری برنامه‌ریزی برای توسعه این فناوری کاملاً توجیه‌پذیر است.

مروری بر روندهای بازار جهانی در سال ۲۰۲۳

بازار جهانی ژنراتورهای استاتیک توان راکتیو در سال ۲۰۲۳ با سرعت قابل توجهی توسعه و تحول یافته است. این تجهیزات در صنایع مختلف به‌عنوان راهکاری مؤثر برای بهبود کیفیت توان، اهمیت فزاینده‌ای یافته‌اند. با افزایش تقاضا برای انرژی الکتریکی، حفظ پایداری ولتاژ به یکی از الزامات اساسی در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت تبدیل شده است. سامانه‌های SVG با جبران‌سازی فعال توان راکتیو، به بهبود ضریب توان و افزایش بهره‌وری در سیستم‌های انتقال و توزیع انرژی الکتریکی کمک می‌کنند. چین نیز به تدریج به یکی از بازیگران مهم بازار جهانی SVG تبدیل می‌شود. شماری از تولیدکنندگان داخلی این کشور، با تمرکز بر ارتقای طراحی، عملکرد و قابلیت‌های عملیاتی ژنراتورهای استاتیک توان راکتیو، در حال توسعه راهکارهای نوآورانه هستند.



3 Static Var Generation

شرکت‌های بزرگی همچون زیمنس و ABB در تلاش هستند تا جایگاه پیشرو خود را در زمینه ارائه راهکارهای مبتنی بر ژنراتور توان راکتیو (SVG^۳) تثبیت کنند. این شرکت‌ها با برخورداری از دانش فنی و تجربه گسترده، قادر به طراحی و توسعه سامانه‌هایی هستند که ضمن بهبود کیفیت توان، موجب افزایش بهره‌وری و عملکرد پایدار شبکه می‌شوند. افزون بر این، بر اساس گزارش اخیر مؤسسه Research and Markets، پیش‌بینی می‌شود بازار جهانی ژنراتورهای استاتیک توان راکتیو طی پنج سال آینده (۲۰۲۳-۲۰۲۸) با نرخ رشد سالانه حدود ۵/۸ درصد توسعه یابد. این روند نشان‌دهنده اهمیت روزافزون تأمین توان پایدار و قابل اعتماد در بخش‌های مختلف، به‌ویژه در صنایع و شبکه‌های برق چین، است. با این حال، توسعه و بکارگیری این فناوری با چالش‌هایی همراه است. بسیاری از شرکت‌های برق همچنان نسبت به سرمایه‌گذاری در این حوزه رویکردی محتاطانه دارند؛ زیرا هزینه‌های اولیه قابل توجه و الزامات مربوط به نگهداری و بهره‌برداری بلندمدت، از عوامل بازدارنده محسوب می‌شوند. علاوه بر این، زیرساخت‌های موجود همواره فرایندی ساده نیست و به برنامه‌ریزی دقیق، ارزیابی فنی و بررسی جامع الزامات شبکه نیاز دارد. در مجموع، روشن است که ادغام فناوری SVG در ساختار انرژی چین مستلزم اتخاذ رویکردی نظام‌مند و سنجیده است.

SVGها می‌توانند این نوسانات را تعدیل کرده و پایداری شبکه در تأمین توان الکتریکی را تضمین نمایند. با این حال، چالش اصلی در چگونگی پیاده‌سازی و یکپارچه‌سازی این سامانه‌ها با زیرساخت‌های موجود نهفته است؛ به‌طوری‌که هزینه‌های اولیه و پیچیدگی‌های فنی مرتبط با نصب آن‌ها همچنان از دغدغه‌های مهم به‌شمار می‌روند.

پیاده‌سازی فناوری SVG نیازمند برنامه‌ریزی دقیق، طراحی مهندسی حساب‌شده و اجرای ضابطه‌مند است. اگرچه این سامانه‌ها سطوح بالایی از کارایی را ارائه می‌دهند، عدم ارزیابی جامع در مراحل نصب ممکن است چالش‌های فنی غیرمنتظره‌ای ایجاد کند. از این‌رو، ایجاد توازن میان افزایش بهره‌وری عملیاتی و هزینه‌های پیاده‌سازی، متغیری تعیین‌کننده در توسعه آتی سیستم‌های قدرت خواهد بود.

افزایش بهره‌وری مهم‌ترین هدف این تلاش‌ها محسوب می‌شود؛ با این حال، همچنان چالش‌هایی در این مسیر وجود دارد.

روندهای بازار نشان می‌دهند که پذیرش فناوری SVG در سراسر جهان رو به افزایش است. صنایع مختلف با تأکید بر بهره‌وری انرژی، تلاش می‌کنند فعالیت‌های خود را با اهداف زیست‌محیطی و الزامات توسعه پایدار همسو کنند. با این حال، همه مناطق جغرافیایی و بخش‌های صنعتی از آمادگی یکسانی برای پذیرش این فناوری برخوردار نیستند.

نقش ژنراتورهای استاتیک توان راکتیو در

پایداری و بهره‌وری سیستم‌های قدرت

ژنراتورهای استاتیک توان راکتیو نقشی کلیدی در ارتقای پایداری و بهره‌وری سیستم‌های قدرت ایفا می‌کنند. این تجهیزات وظیفه تنظیم دینامیکی و برخط^۴ توان راکتیو را بر عهده دارند. پاسخ فرکانسی سریع این سامانه‌ها به تغییرات ناگهانی بار، آن‌ها را به اجزای جدایی‌ناپذیر شبکه‌های برق مدرن تبدیل کرده است.

در کشور چین، ادغام و بهره‌برداری از تجهیزات SVG مزایای چشمگیری به همراه داشته است. این فناوری امکان مدیریت مؤثرتر منابع انرژی تجدیدپذیر را که ذاتاً با نوسانات تولید همراه هستند، فراهم می‌سازد.

4 Real-time



بازیگران کلیدی بازار ژنراتورهای استاتیک توان راکتیو در چین

رشد بازار ژنراتورهای استاتیک توان راکتیو در سال ۲۰۲۳ عمدتاً تحت تأثیر نیاز روزافزون به بهبود کیفیت توان و افزایش بهره‌وری سیستم‌های قدرت شکل گرفته است. بر اساس گزارش‌های معتبر منتشرشده در این صنعت، پیش‌بینی می‌شود بازار SVG در فاصله سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۸ با نرخ رشد مرکب سالانه (CAGR^۵) بیش از ۱۰ درصد رشد کند. افزایش تقاضا برای انرژی الکتریکی و حرکت به‌سوی توسعه پایدار، از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر این رشد به شمار می‌روند.

در همین راستا، بسیاری از بازیگران اصلی بازار سرمایه‌گذاری گسترده‌ای با هدف ارتقای عملکرد اصلاح ضریب توان انجام داده‌اند. چندین شرکت در حال ارائه راهکارهای نوآورانه در حوزه SVG هستند. تمرکز اصلی این شرکت‌ها بر توسعه تجهیزاتی با بازده بالاتر است که بتوانند توان راکتیو را به‌صورت مؤثر مدیریت کنند. این تجهیزات نه تنها به تثبیت ولتاژ کمک می‌کنند، بلکه می‌توانند عمر مفید تجهیزات الکتریکی را نیز افزایش دهند. گزارش‌ها نشان می‌دهند که به‌کارگیری SVGها در برخی کاربردها می‌تواند به بهبود بهره‌وری تا ۲۰ درصد منجر شود. با این حال، چالش‌هایی نیز وجود دارد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به هزینه‌های اولیه قابل توجه و نیاز به نیروی انسانی متخصص برای بهره‌برداری مؤثر از این سامانه‌ها اشاره کرد. علاوه بر این، ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر، پیچیدگی بیشتری به فضای فناوری SVG افزوده است.

5 Compound annual growth rate

تحلیل مقایسه‌ای فناوری‌های مختلف

ژنراتورهای استاتیک توان راکتیو

باورند که اتخاذ رویکردی متوازن می‌تواند به افزایش تاب‌آوری و بهره‌وری مدیریت توان در سراسر چین منجر شود.

فناوری SVG انتخاب‌شده باید با شرایط خاص شبکه و الگوی بار سازگاری داشته باشد. با این حال، تأمین‌کنندگان انرژی در چین در بسیاری از موارد این الزامات اساسی را نادیده می‌گیرند و در نتیجه، سامانه با عملکردی پایین‌تر از سطح مطلوب مواجه می‌شود. برطرف کردن این کاستی‌ها می‌تواند اثربخشی نصب و بهره‌برداری از ژنراتورهای راکتیو در چین را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد و در تحقق اهداف ملی این کشور در زمینه پایداری و بهره‌وری انرژی مؤثر باشد.

تأثیر ژنراتورهای استاتیک توان راکتیو بر

یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر

ژنراتورهای استاتیک توان راکتیو نقشی اساسی در منابع انرژی تجدیدپذیر ایفا می‌کنند. این تجهیزات با تنظیم سطوح ولتاژ، به حفظ عملکرد پایدار شبکه کمک می‌کنند. در چین، رشد شتابان ظرفیت تولید برق از منابع خورشیدی و بادی، نیاز به مدیریت مؤثر توان راکتیو را افزایش داده است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که SVGها می‌توانند

ژنراتورهای استاتیک توان راکتیو نقشی حیاتی در افزایش بهره‌وری سیستم‌های قدرت ایفا می‌کنند. این تجهیزات با ارتقای پایداری ولتاژ و کاهش تلفات در شبکه‌های الکتریکی، عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشند. در چین، فناوری SVG به دلیل قابلیت آن در جبران‌سازی دینامیکی توان در جبران‌سازی دینامیکی توان راکتیو، با توجه به گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (IEA⁶) پیش‌بینی می‌شود تقاضا برای سامانه‌های SVG در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر چین، سالانه بیش از ۱۵ درصد رشد کند.

فناوری‌های مختلف SVG مزایا و چالش‌های منحصر به فردی دارند. برای نمونه، مبدل‌های منبع ولتاژ (VSC⁷) انعطاف‌پذیری بیشتری در کنترل توان راکتیو فراهم می‌کنند. از سوی دیگر، سامانه‌های مبتنی بر ترستور ممکن است هزینه اولیه کمتری داشته باشند، اما معمولاً از زمان پاسخ کندتری برخوردارند. تفاوت در ویژگی‌های پاسخ دینامیکی این فناوری‌ها، ضرورت ارزیابی دقیق هنگام برنامه‌ریزی و طراحی سیستم‌های قدرت را آشکار می‌سازد. در این فرایند، باید میان هزینه‌های نصب و صرفه‌جویی‌های عملیاتی بلندمدت توازن مناسبی برقرار شود. تحلیلگران صنعت بر این

6 International Energy Agency

7 Voltage-Source Converter

استاتیک توان راکتیو نتایج بسیار امیدوارکننده‌ای نشان داده است. صنایع متعددی برای ارتقای بهره‌وری و قابلیت اطمینان عملیاتی، به پذیرش این فناوری‌ها روی آورده‌اند. به عنوان نمونه، یکی از شرکت‌های خودروسازی با نوسانات مکرر ولتاژ مواجه بود که خطوط تولید آن را تحت تأثیر قرار می‌داد. این مجموعه با پیاده‌سازی سامانه‌های SVG موفق شد سطوح ولتاژ را تثبیت کرده و از این طریق، تداوم عملیات بدون توقف را تضمین نماید. این مورد به خوبی نشان می‌دهد که فناوری SVG چگونه می‌تواند مسائل رایج در محیط‌های صنعتی را برطرف سازد.

علاوه بر این، بخش تولید برق نیز شاهد تحولات مثبتی بوده است. یک مزرعه بادی در شمال چین با چالش‌های مدیریت توان راکتیو دست‌وپنجه نرم می‌کرد که به کاهش توان خروجی آن انجامیده بود. پس از همکاری با یک تأمین‌کننده معتبر ژنراتورهای استاتیک توان راکتیو، این نیروگاه توانست ضریب توان خود را بهبود بخشیده و تلفات را کاهش دهد. این تغییر و تحول نه تنها موجب افزایش تولید انرژی شد، بلکه بهره‌وری کلی سامانه را نیز بهینه‌سازی کرد.

با این حال، تمامی موارد پیاده‌سازی بی نقص نبوده‌اند؛ برخی از مراکز صنعتی در مراحل اولیه، هزینه‌های نگهداری و تعمیری بالاتر از حد انتظار گزارش کرده‌اند.

ضریب توان را تا ۳۰ درصد بهبود دهند؛ قابلیت‌هایی که به طور قابل توجهی موجب ارتقای پایداری شبکه می‌شود.

مزایای یکپارچه‌سازی ژنراتورهای استاتیک توان راکتیو به وضوح قابل مشاهده است. برای مثال، نتایج یک مطالعه نشان داده است که نصب SVG در یک مزرعه بادی می‌تواند فلیکر ولتاژ^۸ را تا ۵۰ درصد کاهش دهد. این امر برای حفظ کیفیت و قابلیت اطمینان توان اهمیت زیادی دارد. افزون بر این، SVGها قادرند به تغییرات بار و تولید توان با سرعت زیادی پاسخ دهند و بدین ترتیب، سازگاری شبکه را با ماهیت متناوب و ناپایدار تولید انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش دهند.

با این حال، همچنان چالش‌هایی در این زمینه وجود دارد. سرمایه‌گذاری اولیه مورد نیاز برای ژنراتورهای استاتیک توان راکتیو با کیفیت ممکن است قابل توجه باشد و برخی توسعه‌دهندگان را از به کارگیری این فناوری منصرف کند. افزون بر آن، یکپارچه‌سازی نادرست SVGها می‌تواند به ناپایداری سیستم منجر شود. بنابراین، انجام پژوهش‌های مستمر برای بهینه‌سازی فرایند استقرار SVG و افزایش قابلیت اطمینان آن در محیط‌ها و شرایط کاری گوناگون ضروری است.

مطالعات موردی: نمونه‌های موفق

پیاده‌سازی در صنایع چین

در بخش تولید و صنایع چین، استفاده از ژنراتورهای

⁸ voltage flicker

افزون بر این، شمار فزاینده‌ای از شرکت‌ها در حال بررسی طراحی‌های مدولار^۹ با هدف سهولت نصب و توسعه‌پذیری بیشتر هستند. این انعطاف‌پذیری به صنایع امکان می‌دهد تا راهکارهای مدیریت توان خود را مطابق با نیازهای خاص و منحصر به فرد خود سفارشی‌سازی کنند. در کنار این تحولات، ابزارهای پایش دیجیتال با ارائه داده‌های زمان واقعی یا برخط، بهره‌برداران را قادر می‌سازند تا تصمیمات آگاهانه‌تری اتخاذ کرده و عملکرد سامانه را بهینه‌سازی نمایند.

با این حال، پذیرش راهکارهای SVG بدون چالش نیست. بسیاری از صنایع هنوز با ظرفیت‌های کامل این سامانه‌ها آشنایی کافی ندارند و این امر می‌تواند به بهره‌برداری ناقص از تجهیزات نصب‌شده منجر شود. در چنین شرایطی، آموزش نیروی انسانی و ارائه پشتیبانی مستمر برای بهره‌برداری حداکثری از مزایای فناوری SVG نقشی حیاتی ایفا می‌کند. در حالی که فعالان این حوزه به اصلاح و بهبود مستمر سامانه‌ها ادامه می‌دهند، صنعت باید بر رفع شکاف دانشی موجود نیز تمرکز کند. ایجاد فضایی مبتنی بر یادگیری و همکاری، گامی تعیین‌کننده در جهت بهره‌برداری کامل از ظرفیت‌های ژنراتورهای استاتیک توان راکتیو در آینده خواهد بود.

این امر ضرورت برنامه‌ریزی جامع و بهره‌گیری از مشاوره‌های تخصصی تأمین‌کنندگان سامانه‌های SVG را برجسته می‌سازد. مهار و مدیریت این چالش‌ها می‌تواند به دستیابی به عملکرد و قابلیت اطمینان به مراتب بالاتری بینجامد. در نهایت، اگرچه فناوری SVG مزایای متعددی به همراه دارد، اتخاذ رویکردی کارشناسانه و ارزیابی همه‌جانبه، شرط اساسی یکپارچه‌سازی موفق آن خواهد بود.

روندهای آتی و نوآوری‌ها در راهکارهای ژنراتورهای استاتیک توان راکتیو در چین

تقاضا برای راهکارهای ژنراتور استاتیک توان راکتیو در چین با سرعت چشمگیری در حال تحول است. با توجه به چالش‌های پیش روی صنایع در زمینه بهره‌وری انرژی و پایداری شبکه، سامانه‌های SVG به طور فزاینده‌ای به عنوان ابزارهایی ضروری شناخته می‌شوند. این سامانه‌ها با مدیریت مؤثر توان راکتیو، به ارتقای کیفیت توان کمک شایانی می‌کنند. همچنین، با کاهش نوسانات ولتاژ، صنایع را در حفظ بهره‌وری عملیاتی، کاهش تلفات انرژی و افزایش عمر مفید تجهیزات یاری می‌رسانند.

نوآوری در فناوری SVG از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پیشرفت‌های اخیر عمدتاً بر بهبود زمان پاسخ‌دهی و ارتقای الگوریتم‌های کنترلی متمرکز بوده‌اند.

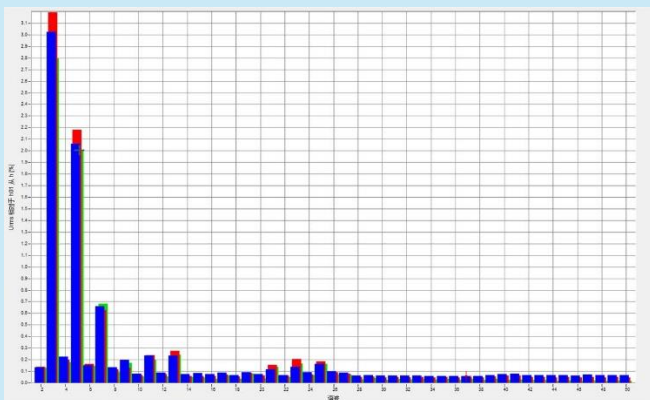
نمونه‌هایی از استقرار ژنراتور استاتیک توان راکتیو در منابع انرژی تجدید پذیر کشور چین

نیروگاه فتوولتاییک

Shanxi Huancuishan



استقرار گسترده ژنراتورهای سنکرون استاتیک با سطح
ولتاژ ۳۵ کیلوولت با سیستم خنک‌کاری آبی^۱ و مبتنی بر
ماژول‌های IGBT، یکی از کلیدی‌ترین راهکارهای فنی چین برای
پایداری شبکه در کلان پروژه‌های تجدیدپذیر (باد و خورشید) در مناطق
گانسو، چینگ‌های و نینگ‌شیا است.
پروژه SVG ۱۰ کیلوولت با ظرفیت نامی ± 4 مگاوار که در نیروگاه فتوولتاییک
Shanxi Huancuishan نصب شده است، در شکل نشان داده شده است.



قبل از نصب SVG

طیف هارمونیک ولتاژ قبل و بعد از نصب SVG

طیف

هارمونیک ولتاژ

نیروگاه فتوولتائیک قبل

و بعد از راه اندازی SVG

نشان داده شده است. این مقایسه

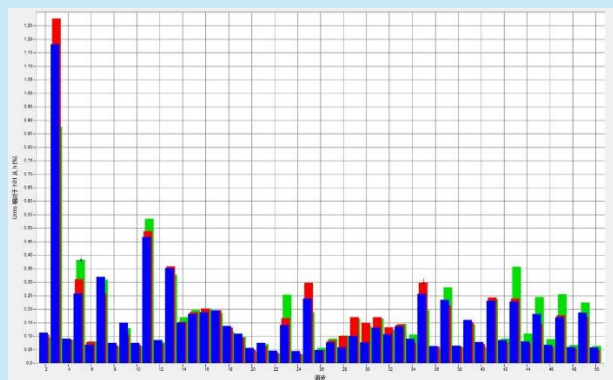
نشان می دهد که پس از راه اندازی

SVG، هارمونیک های ولتاژ

۳۵ کیلوولت به طور قابل توجهی

کاهش یافته است که نشان دهنده

یک اثر فیلترینگ قابل توجه است.



بعد از نصب SVG

جداول ارائه شده، مقایسه‌ای از داده‌های هارمونیک ولتاژ ۳۵ کیلوولت و هارمونیک جریان در سمت نیروگاه فتوولتائیک ارائه می‌دهند. بدون SVG، اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ سه‌فاز و محتوای هارمونیک‌های سوم، پنجم و هفتم در سمت ۳۵ کیلوولت، همگی از حد استاندارد ملی (چین) فراتر می‌روند، به طوری که THD به ۶.۲۷٪ می‌رسد که بسیار فراتر از حد استاندارد ملی (چین) یعنی ۳ درصد است. پس از اجرای SVG، محتوای هر هارمونیک و THD هر دو الزامات استاندارد ملی (چین) را برآورده می‌کنند.

حد مجاز استاندارد ملی (چین)	فاز C		فاز B		فاز A		مرتبه هارمونیک ولتاژ
	بدون SVG	با SVG	بدون SVG	با SVG	بدون SVG	با SVG	
۲.۴٪	۴.۰۱٪	۰.۹۷٪	۴.۰۸٪	۱.۳۲٪	۳.۸۸٪	۱.۲۴٪	مرتبه ۳
۲.۴٪	۴.۰۷٪	۰.۷۲٪	۴.۶۰٪	۰.۵۸٪	۴.۱۹٪	۰.۵۴٪	مرتبه ۵
۲.۴٪	۲.۳۸٪	۰.۴۹٪	۲.۲۹٪	۰.۴۲٪	۲.۲۶٪	۰.۴۹٪	مرتبه ۷
۳.۰۰٪	۶.۰۰٪	۱.۷۳٪	۶.۲۷٪	۱.۹۳٪	۶.۰۶٪	۱.۷۸٪	اعوجاج هارمونیک کل (THD)

حد مجاز استاندارد ملی (چین)	فاز C		فاز B		فاز A		مرتبه هارمونیک جریان
	بدون SVG	با SVG	بدون SVG	با SVG	بدون SVG	با SVG	
۴.۵۰ آمپر	۲۶۱ آمپر	۰.۶۶ آمپر	۱.۸۸ آمپر	۰.۵۹ آمپر	۲.۰۹ آمپر	۰.۷۴ آمپر	مرتبه ۳
۴.۶۸ آمپر	۱۳.۴۵ آمپر	۱.۰۱ آمپر	۱۵.۳۶ آمپر	۰.۹۷ آمپر	۱۳.۴۶ آمپر	۱.۱۵ آمپر	مرتبه ۵
۳.۶۴ آمپر	۶.۰۳ آمپر	۱.۲۶ آمپر	۵.۵۸ آمپر	۰.۹۱ آمپر	۵.۲۸ آمپر	۱.۲۴ آمپر	مرتبه ۷

نسل جدید چراغ‌های روشنایی معابر



صنعت روشنایی معابر در آستانه یک تحول مهندسی بزرگ قرار دارد. شرکت‌های پیشرو جهانی مانند Signify, Schröder, Eaton و Acuity Brands ، با تلفیق پیشرفت‌های فوتونیک ال‌ای‌دی، اینترنت اشیاء صنعتی و استانداردهای جدید رابط سخت‌افزاری، نسل تازه‌ای از چراغ‌های خیابانی را معرفی کرده‌اند که هم ایمنی الکتریکی را به‌طور محسوس افزایش می‌دهند و هم تعمیرپذیری و ارتقای قطعات را برای شهرها ساده و کم‌هزینه می‌سازند.

چراغ معابر به عنوان زیرساخت هوشمند و ایمن

در شهرهای اروپایی، شبکه‌های روشنایی دیگر صرفاً «منبع نور» نیستند؛ آن‌ها به لایه‌ای از زیرساخت دیجیتال تبدیل شده‌اند که داده‌های انرژی، ترافیک و محیطی را جمع‌آوری و مدیریت می‌کند. با این حال، هوشمندسازی بدون ارتقای هم‌زمان ایمنی الکتریکی و قابلیت نگهداری، ریسک‌های جدیدی ایجاد می‌کند. پاسخ مهندسان به این چالش، بازطراحی اساسی در سطح مازول‌ها، درایورها، کانکتورها و پروتکل‌های ارتباطی بوده است.

طراحی‌های نوین برای ایمنی الکتریکی بالاتر

فناوری‌های جدید در چراغ‌های معابر، ایمنی الکتریکی را در چند لایه تقویت می‌کنند:

- محافظت در برابر صاعقه و اضافه‌ولتاژ (Surge):
(Protection) نسل جدید درایورهای ال‌ای‌دی برای معابر، حفاظت حداقل ۱۰ کیلوولت در برابر surge را به صورت استاندارد ارائه می‌دهند و در مناطق پرخطر تا ۲۰ کیلوولت نیز ارتقا می‌یابند. این سطح از حفاظت، آسیب‌های ناشی از صاعقه و کلیدزنی‌های شبکه برق را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد و عمر الکترونیک چراغ را افزایش می‌دهد.

- عایق‌بندی کلاس II و حفاظت: IP66/IP67 طراحی‌های جدید با عایق‌بندی مضاعف کلاس (II) و درجه حفاظت IP66 یا IP67، نفوذ آب، رطوبت و گردوغبار به محفظه الکترونیک را عملاً غیرممکن می‌سازند. این ویژگی به‌ویژه در شهرهای ساحلی و پربارش، از خوردگی بردها، اتصال کوتاه و خرابی زودرس جلوگیری می‌کند.

- مدیریت حرارتی هوشمند: استفاده از هیت‌سینک‌های آلومینیومی بهینه‌شده، مواد رسانای حرارتی پیشرفته و حسگرهای دمایی تعبیه‌شده، دمای junction ال‌ای‌دی و قطعات الکترونیکی را در محدوده ایمن نگه می‌دارد. برخی درایورها در صورت تشخیص دمای بیش‌ازحد، به طور خودکار جریان را کاهش می‌دهند (thermal derating) تا از سوختن قطعات و خطر آتش‌سوزی جلوگیری شود.

- پایش لحظه‌ای جریان، ولتاژ و نشتی: مازول‌های هوشمند جدید، پارامترهای الکتریکی را به صورت بلادرنگ اندازه‌گیری و به پلتفرم مدیریت مرکزی ارسال می‌کنند. تشخیص زودهنگام نشتی جریان به زمین، اضافه‌جریان یا نوسانات ولتاژ، امکان قطع پیش‌دستانه مدار یا اعزام تیم تعمیرات پیش از بروز حادثه را فراهم می‌آورد.

- ایزولاسیون الکتریکی و طراحی‌های **Low Voltage**: در برخی طراحی‌های نوین، بخش‌های توان بالا (درایور و مازول ال‌ای‌دی) از بخش‌های کنترل و ارتباطی به صورت الکتریکی ایزوله می‌شوند و ولتاژهای پایین‌تر (مثلاً ۲۴ یا ۴۸ ولت DC) برای بخش‌های حسگر و ارتباطی به کار می‌رود. این معماری، خطر برق‌گرفتگی برای پرسنل نگهداری و احتمال تداخل الکترومغناطیسی را کاهش می‌دهد.

تعمیرپذیری و ارتقای آسان از «تعویض کل چراغ» به «تعویض مازول»

یکی از مهم‌ترین تغییرات پارادایم در این نسل، گذار از «چراغ یک‌پارچه و غیرقابل تعمیر» به «چراغ مازولار با قطعات استاندارد و قابل تعویض» است. این رویکرد، هم هزینه چرخه عمر را کاهش می‌دهد و هم وابستگی به یک تأمین‌کننده خاص را کم می‌کند.

- استاندارد **Zhaga** و رابط‌های **D4i**: کنسرسیوم Zhaga با تعریف مجموعه‌ای از مشخصات فنی موسوم به «Book»، ابعاد فیزیکی، الگوی سوراخ‌های نصب و فرمت کانکتور مازول‌های ال‌ای‌دی، درایورها، حسگرها و گره‌های ارتباطی را یکسان‌سازی کرده است. برای مثال، استاندارد Zhaga Book 18 معروف به Zhaga-D4i یک سوکت استاندارد کم‌حجم روی بدنه چراغ تعبیه می‌کند که امکان نصب plug-and-play فتوسل‌ها، شبکه‌های بی‌سیم (LTE/5G/NB-IoT) و حسگرهای محیطی را بدون نیاز به بازطراحی چراغ فراهم می‌آورد.



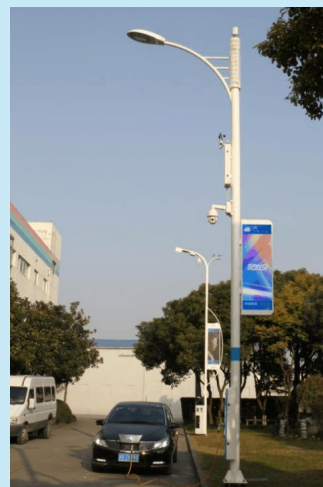
- **ماژول‌های ال‌ای‌دی قابل تعویض (Zhaga)**
(Book 2, 7, 13, 15, 19): این مشخصات، فرمت ماژول‌های ال‌ای‌دی مورد استفاده در روشنایی معابر و فضای باز را استاندارد کرده‌اند. نتیجه آن است که ماژول‌های سازگار با Zhaga از تولیدکنندگان مختلف، در چراغ‌های سازگار با این استاندارد، قابل تعویض باشند. بهره‌برداران می‌توانند در میانه عمر چراغ، ماژول‌های کم‌بازده را با نسل‌های جدید پربازده‌تر جایگزین کنند، بدون آنکه نیاز به تعویض کامل بدنه یا پایه باشد.
- **درایورهای ماژولار و قابل ارتقا:** در طراحی‌های جدید، درایور به‌صورت یک ماژول مستقل با کانکتور استاندارد تعبیه می‌شود. با ظهور پروتکل‌های ارتباطی جدید یا نیاز به قابلیت‌های هوشمندتر (مثلاً پشتیبانی از DALI-2، D4i یا پروتکل‌های خاص شهری)، می‌توان تنها درایور را تعویض یا ارتقا داد. این امر، سرمایه‌گذاری بلندمدت ایمن‌تر و انعطاف‌پذیرتری را برای بهره‌برداران ایجاد می‌کند.
- **تعمیر در سطح میدان (Field-Servicable Design):** بسیاری از چراغ‌های نسل جدید، بدون نیاز به باز کردن کامل بدنه و با ابزار ساده قابل دسترسی به ماژول‌ها و درایور هستند. برخی تولیدکنندگان، مکانیزم‌های «کلیکی» یا «ریلی» طراحی کرده‌اند که تعویض ماژول ال‌ای‌دی یا درایور را در کمتر از چند دقیقه ممکن می‌سازد. این ویژگی، زمان خاموشی چراغ را به حداقل رسانده و ایمنی ترافیکی معابر را در حین تعمیرات حفظ می‌کند.
- **تشخیص خودکار قطعه و به‌روزرسانی نرم‌افزار:** ماژول‌های هوشمند جدید، شناسه یکتا و اطلاعات نسخه سخت‌افزاری/نرم‌افزاری خود را به پلتفرم مدیریت اعلام می‌کنند. در صورت تعویض ماژول، سیستم به‌طور خودکار قطعه جدید را شناسایی و در صورت نیاز، نرم‌افزار را به‌روز می‌کند. این قابلیت، خطای انسانی در پیکربندی را کاهش و یکپارچگی شبکه را افزایش می‌دهد.

فناوری‌های کلیدی پشتیبان نسل جدید

چراغهای معابر

چند فناوری اصلی، این نسل از چراغ‌ها را ممکن ساخته است:

- ال ای دی های تطبیقی و قابل تنظیم طیفی: آرایه های ال ای دی با امکان کمسو کنندگی^{۱۰} پویا و تغییر دمای رنگ، نه تنها مصرف انرژی را بهینه می کنند، بلکه با کاهش نور آبی در ساعات شب، اثرات منفی بر ریتم ساعت زیستی شهروندان و اکوسیستم شبانه را کم می کنند.
- اینترنت اشیاء صنعتی و پروتکل های باز: استفاده از پروتکل هایی مانند DALI-2 ، D4i ، Zhaga ، و استانداردهای NEMA در کنار ارتباطات سلولی (LTE/5G/NB-IoT) ، امکان مدیریت متمرکز، پایش تک تک چراغ ها و ادغام با سایر سامانه های شهری را فراهم می آورد.
- هوش مصنوعی و نگهداری پیش بینانه: الگوریتم های تعبیه شده روی میکروکنترلرها، الگوهای مصرف، دما و عملکرد نوری را تحلیل و خرابی های احتمالی را پیش بینی می کنند. در نتیجه منجر به کاهش هزینه های نگهداری و افزایش پایداری شبکه می شود.
- پایه های هوشمند چندمنظوره (Smart Poles) : تیرهای چراغ برق به گره هایی تبدیل شده اند که علاوه بر نور، می توانند سلول های کوچک G5، شارژرهای خودروی برقی، نقاط دسترسی وای فای و آرایه ای از حسگرهای محیطی را میزبانی کنند. این هم گرایی، روشنایی معابر را به بخشی از زیرساخت مشترک مخابرات، تحرک و پایش محیطی بدل می سازد.



10 dimming

پیامد بکارگیری چراغ‌های نسل جدید برای چشم‌انداز

کاربران و بهره‌برداران

تا پایان این دهه، مرز میان «روشنایی معابر» و «زیرساخت حسگری و ارتباطی شهری» عملاً محو خواهد شد. در این آینده، ایمنی الکتریکی چندلایه و تعویض‌پذیری استاندارد، نه یک گزینه لوکس، بلکه شرط لازم پایداری فنی و اقتصادی شبکه‌های روشنایی خواهند بود.

برای شهرهایی با زیرساخت فنی قوی، این تحولات سه مزیت استراتژیک ایجاد می‌کند:

۱. کاهش ریسک ایمنی و افزایش پایداری شبکه :
با حفاظت بهتر در برابر surge، عایق‌بندی پیشرفته و پایش لحظه‌ای، احتمال حوادث الکتریکی و خاموشی‌های ناگهانی کاهش می‌یابد.

۲. کاهش هزینه چرخه عمر: تعویض‌پذیری ماژول‌ها و درایورها، نیاز به تعویض کامل چراغ را به تعویق می‌اندازد و امکان ارتقای تدریجی شبکه را فراهم می‌کند.

۳. انعطاف‌پذیری در برابر آینده: با استانداردهای باز و طراحی ماژولار، بهره‌برداران می‌توانند بدون قفل‌شدن در اکوسیستم یک تأمین‌کننده، فناوری‌های جدید (حسگرها، پروتکل‌ها، الگوریتم‌ها) را به تدریج به شبکه اضافه کنند.



شناسنامه

پژوهشگاه نیرو، پژوهشکده انتقال و توزیع برق، گروه پژوهشی الکترونیک قدرت

مدیر مسئول: بنفشه همدانی

سر دبیر و ویراستار: محمد بابائی وندیشی

همکاران این شماره: بنفشه همدانی، سعید محقق، احسان هاشمزاده، محمد بابائی وندیشی



آدرس: تهران / شهرک قدس / انتهای بلوار شهید دامن / پژوهشگاه نیرو

تلفن: ۰۲۱-۴۳۷۶۷۱۷۵ کد پستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳ صندوق پستی: ۱۴۶۶۵۵۱۷ رایانامه: bhamedani@nri.ac.ir