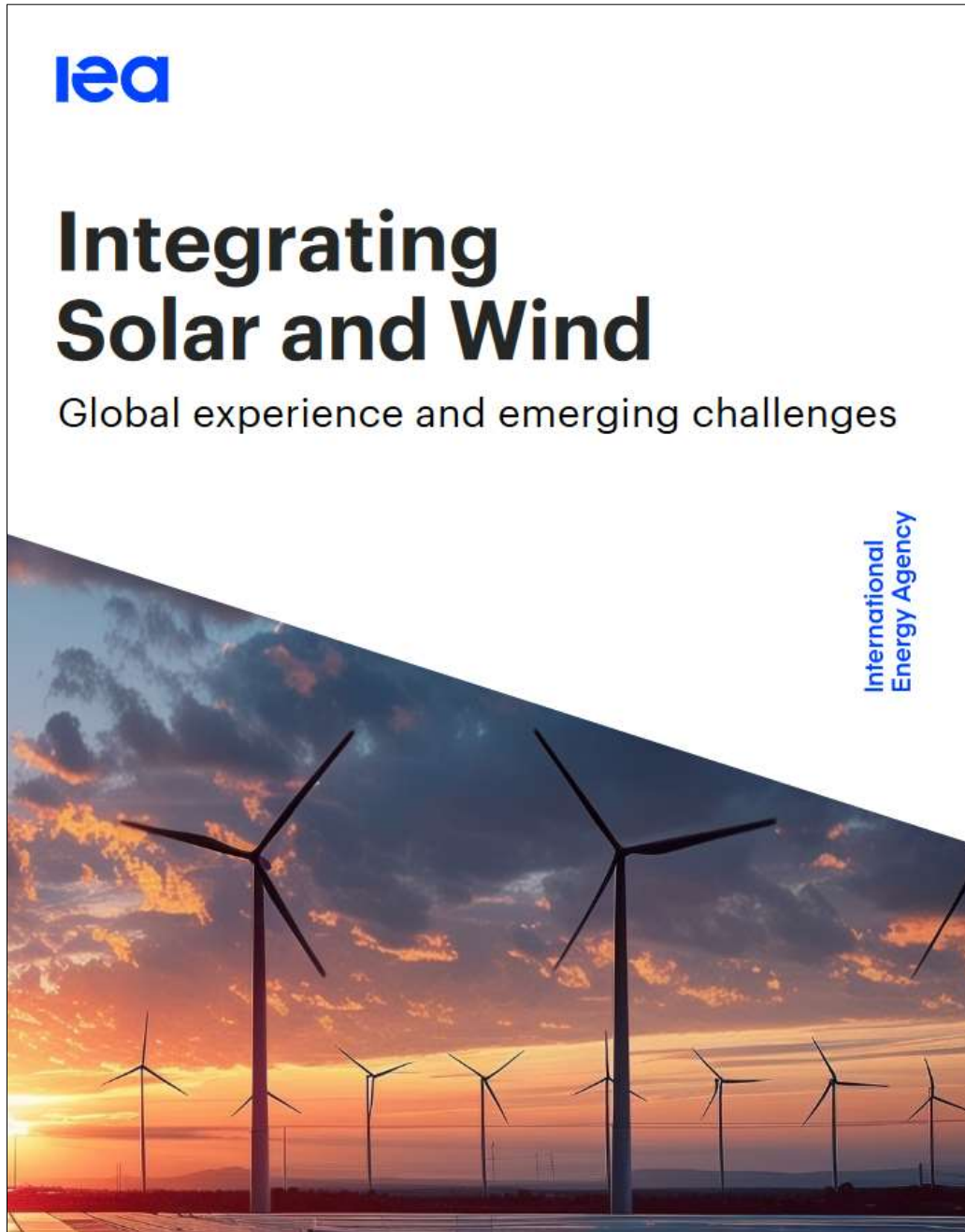


یکپارچه سازی نیروگاه های خورشیدی و بادی در شبکه های برق

(تجارب بین المللی و چالشهای پیش رو)



یکپارچه سازی زمان بندی شده برای جذب گسترده انرژی های تجدیدپذیر در شبکه ضروری است

تحقق پتانسیل کامل گسترش فتوولتائیک خورشیدی و باد مستلزم استراتژی های یکپارچه سازی پیشگیرانه است. بین سال های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳، علاوه بر اینکه ظرفیت فتوولتائیک خورشیدی و باد بیش از دو برابر شد، سهم آنها در تولید برق نیز تقریباً دو برابر شد. دولت ها این منابع را به عنوان ستون های کلیدی برای کربن زدایی بخش انرژی قرار می دهند و انتظار می رود که ظرفیت تا سال ۲۰۳۰ با سرعت بیشتری افزایش یابد، که ناشی از یک سیاست حمایتی و کاهش هزینه های اخیر در فتوولتائیک خورشیدی و باد است. تعهد COP28 برای سه برابر کردن ظرفیت جهانی تجدیدپذیر تا سال ۲۰۳۰ نشان می دهد که رشد می تواند حتی بیش از حد پیش بینی شده شتاب بگیرد و به تلاش ها و سرمایه گذاری های بسیار زیاد برای دستیابی به این هدف بلندپروازانه نیاز دارد.

به حداکثر رساندن مزایای افزایش ظرفیت فتوولتائیک خورشیدی و باد نیاز به ادغام موثر در سیستم های قدرت دارد. در حالی که سیستم های قدرت همواره تغییرات تقاضا را مدیریت کرده اند، انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE) مانند باد و فتوولتائیک خورشیدی، تنوع عرضه را با توجه به آب و هوا معرفی می کنند. این تنوع مستلزم افزایش انعطاف پذیری کل سیستم قدرت، با استفاده از تولید قابل توزیع، بهبود شبکه، افزایش ذخیره سازی و پاسخ تقاضاست. ادغام موفق می تواند مقدار انرژی ای را که ایمن و مقرون به صرفه تهیه شده است، به حداکثر برساند و اقدامات پرهزینه پایداری سیستم را به حداقل رسانده و وابستگی به سوخت های فسیلی را کاهش دهد.

تأخیر در اجرای اقدامات برای حمایت از یکپارچگی این نیروگاه ها در شبکه می تواند تا ۱۵ درصد از تولید برق فتوولتائیک خورشیدی و بادی را در سال ۲۰۳۰ به خطر بیندازد و احتمالاً منجر به کاهش ۲۰ درصدی انتشار دی اکسید کربن (CO₂) در بخش برق خواهد شد. اگر اقدامات یکپارچه سازی مطابق با یک سناریوی همسو با اهداف ملی آب و هوایی اجرا نشود، تا سال ۲۰۳۰ تا ۲۰۰۰ تراوات ساعت (TWh) از تولید جهانی انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE) در معرض خطر قرار می گیرند و دستیابی به تعهدات ملی انرژی و آب و هوا را به خطر می اندازد. این ضرر احتمالی - که معادل خروجی ترکیبی انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE) چین و ایالات متحده در سال ۲۰۲۳ است - ناشی از افزایش احتمالی محدودیت فنی و اقتصادی و همچنین تاخیرهای احتمالی در اتصال پروژه است. در نتیجه، سهم فتوولتائیک خورشیدی و باد در ترکیب برق جهانی در سال ۲۰۳۰ به ۳۰ درصد می رسد، کمتر از ۳۵ درصد در صورتی که اقدامات یکپارچه سازی به موقع اجرا شود. اگر این کاهش با افزایش اتکا به سوخت های فسیلی جبران شود، می تواند منجر به کاهش ۲۰ درصدی کمتر انتشار دی اکسید کربن (CO₂) در بخش برق شود.

دولت ها باید به طور استراتژیک از اقدامات یکپارچه سازی هدفمند حمایت کنند، اما راهنمایی لازم است که در مراحل مختلف اولویت بندی شود. ادغام انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE) برای سال های متمادی یک تمرکز تحقیقاتی کلیدی در بازارهای پیشرو بوده که منجر به پیشنهاد اقدامات فنی، سیاستی و عملیاتی متعددی شده است. با وجود این تحقیقات گسترده، شناسایی اقدامات اولویت دار خاص برای اجرا همچنان چالش برانگیز است. هدف این گزارش حمایت از سیاستگذاران در این زمینه با ارائه به روزرسانی چارچوب یکپارچه سازی انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE) است که آژانس بین المللی انرژی (IEA) از سال ۲۰۱۷ آن را توسعه داده است و متعاقباً با مشارکت وزیران انرژی پاک در نشست انرژی قرن بیست و یکم تجدیدنظر شده است.

این چارچوب شش مرحله افزایش اثرات سیستم از تولید فتوولتائیک خورشیدی و باد را شناسایی می کند که هر کدام چالش ها و راه حل های مربوط به خود را دارند. با ترسیم یک سیستم به فاز فعلی آن، این چارچوب به شناسایی اقدامات اولویت دار یکپارچه سازی کمک می کند و به اشتراک گذاری تجربیات بین سیستم ها را در شرایط مشابه تسهیل می نماید. تعریفی از هر مرحله را می توان در پایان این مطلب یافت.

شش مرحله ادغام انرژی های تجدیدپذیر متغیر

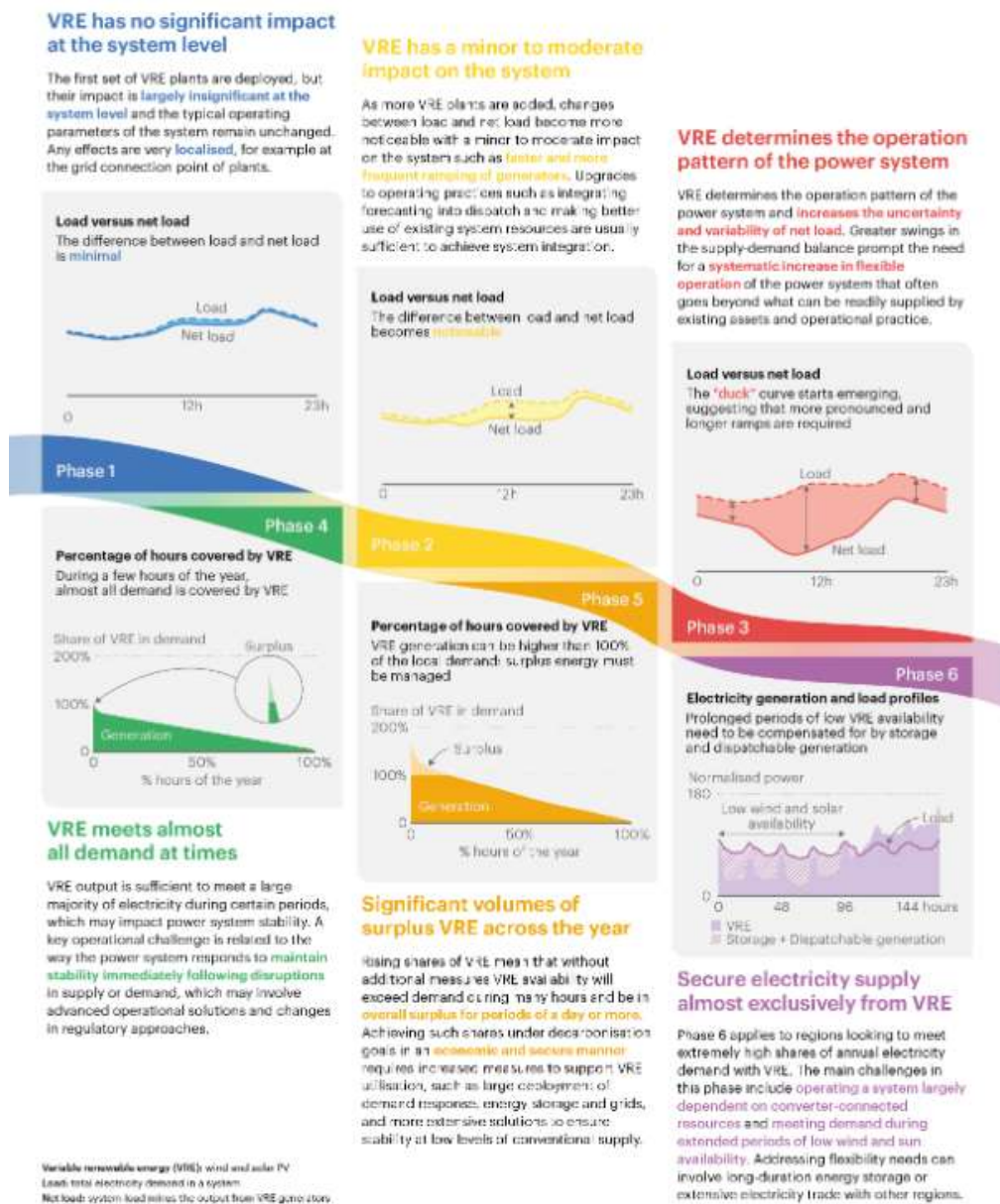
فاز ۱: VRE تاثیر قابل توجهی در سطح سیستم ندارد
فاز ۲: VRE تأثیر جزئی تا متوسطی روی سیستم دارد
فاز ۳: VRE الگوی عملکرد سیستم قدرت را تعیین می کند
فاز ۴: VRE تقریباً تمام تقاضاها را در برخی مواقع برآورده می کند
فاز ۵: حجم قابل توجهی از VRE مازاد در طول سال
فاز ۶: تأمین برق تقریباً منحصراً از VRE

آژانس بین المللی انرژی (IEA)، استراتژی های اثبات شده و اقدامات مشخص برای یکپارچه سازی موفق انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE) را نشان می دهد. این گزارش اولین فهرست جامعی از اقدامات یکپارچه سازی اجرا شده در ۵۰ سیستم برق در سراسر جهان ارائه می کند که نزدیک به ۹۰ درصد از تولید جهانی فتوولتائیک خورشیدی و باد را پوشش می دهد. تجزیه و تحلیل مجموعه ای اصلی از اقداماتی را که به طور جهانی توسط سیستم ها در فاز ۲ ادغام انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE) و بالاتر اتخاذ شده است، شناسایی می نماید. اینها به عنوان راهنمای دولت ها برای شناسایی و اجرای رویکردهای یکپارچه سازی اثبات شده و مؤثر عمل می کنند. به علاوه، جمع بندی بینشی در مورد اقدامات اتخاذ شده در سیستم هایی که در خط مقدم یکپارچه سازی انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE) هستند را فراهم کرده و راهنمای ایجاد استراتژی های آینده نگر را نیز ارائه می دهد.

بیشتر رشد در تولید انرژی‌های تجدیدپذیر متغیر (VRE) در سیستم‌هایی در فازهای پایین ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر متغیر (VRE) رخ می‌دهد (فاز ۱ تا ۳). در سناریویی که در آن کشورها به تعهدات آب و هوایی و انرژی خود به طور کامل و به موقع عمل می‌کنند، پیش‌بینی می‌شود که نزدیک به دو سوم تولید فتوولتائیک خورشیدی و باد اضافی در سال ۲۰۳۰ در مقایسه با سال ۲۰۲۲ در سیستم‌هایی در فازهای پایین ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر متغیر (VRE) رخ دهد. این سیستم‌ها عمدتاً در بازارهای نوظهور و اقتصادهای در حال توسعه (EMDEs)، از جمله هند و برزیل، همراه با سایرین در خاورمیانه، آسیا، آفریقا و آمریکای لاتین قرار دارند. یک سوم باقی مانده از رشد تولید انرژی‌های تجدیدپذیر متغیر (VRE) در سیستم‌های انرژی در مراحل بالای یکپارچه سازی، که بسیاری از آنها در اقتصادهای پیشرفته هستند، صورت می‌گیرد.

Six phases of Variable Renewables Integration

Updated IEA framework



اقدامات مبتنی بر تنظیمات پیش رونده و هدفمند می تواند اکثر ظرفیت های جدید را در سیستم های فاز پایین ادغام کند. سیستم ها در مراحل اولیه یکپارچه سازی اثرات نسبتاً کمی را با افزایش تولید فتوولتائیک خورشیدی و باد تجربه می کنند. با اکثر چالش ها از طریق اصلاحات ساده در دارایی های موجود یا بهبودهای عملیاتی که انعطاف پذیری را افزایش می دهد، قابل رسیدگی است. بررسی های ما نشان می دهد که اقدامات یکپارچه سازی اصلی اجرا شده در تمام ۴۰ سیستم در فاز ۲ یا بالاتر را شناسایی کرد، یک ویژگی مشترک را نشان داد: آنها می توانند به صورت هدفمند و پیش رونده اجرا شوند. این اقدامات شامل بهینه سازی فرآیندهای ارسال و پیش بینی بهبود یافته، درخواست انعطاف پذیری و خدمات سیستمی بالاتر از نیروگاه های معمولی و انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE)، امکان پاسخگویی به تقاضای صنعتی و تقویت زیرساخت شبکه می باشند. مزیت اصلی این اقدامات در سازگاری آنها نهفته است، زیرا نیازی به پیاده سازی کامل یا تحولات گسترده سیستم قدرت، چارچوب های نظارتی یا ساختارهای بازار ندارند. در عوض، آنها یک رویکرد انعطاف پذیر ارائه می کنند که می تواند برای رسیدگی به چالش های خاص در صورت بروز آنها طراحی شود و فرآیند یکپارچه سازی مقرون به صرفه و مقیاس پذیر را تسهیل می کند که در کنار نیازهای متغیر سیستم برق تکامل می یابد.

چالش های یکپارچه سازی نباید به عنوان یک مانع مهم برای گسترش ظرفیت انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE) در سیستم ها در مراحل پایین یکپارچه سازی دیده شود. تأثیرات نسبتاً پایین انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE) در سطح سیستم در سیستم های فاز پایین، همراه با در دسترس بودن اقدامات یکپارچه سازی مقرون به صرفه و قابل پیاده سازی تدریجی، باید نگرانی های مربوط به چالش های یکپارچه سازی را برای کشورهای با نفوذ کم انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE) کاهش دهد. تأثیرات نسبتاً پایین انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE) در سطح سیستم در سیستم های فاز پایین، همراه با در دسترس بودن اقدامات یکپارچه سازی مقرون به صرفه و قابل پیاده سازی تدریجی، باید نگرانی های مربوط به چالش های یکپارچه سازی را برای کشورهای با نفوذ کم انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE) کاهش دهد. با اجرای اقدامات یکپارچه سازی اصلی که در کنار استقرار انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE) شناسایی کردیم، سیستم هایی با ظرفیت فعلی انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE) محدود می توانند جاه طلبی های انرژی پاک خود را به میزان قابل توجهی تسریع بخشند. این رویکرد استراتژیک برای به حداکثر رساندن مزایای فن آوری های انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE)، از جمله تأثیرات مثبت آنها بر کربن زدایی، ارائه انرژی مقرون به صرفه به مصرف کنندگان و کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی، حیاتی است.

Measures taken by systems in Phases 1-5 of VRE integration

Measure to integrate VRE	Phase of VRE integration				
	1	2	3	4	5
Enhance power plant capability					
Retrofit conventional power plants	●	●	●	●	●
Flexible offtake and upstream fuel contracts	●	●	●	●	●
Increase VRE technical requirements	●	●	●	●	●
Forecasting					
VRE generation	●	●	●	●	●
Net load	●	●	●	●	●
Power flows	●	●	●	●	●
Demand-side measures					
Industrial demand response	●	●	●	●	●
Commercial demand response	●	●	●	●	●
Residential demand response	●	●	●	●	●
Steer location of new demand	●	●	●	●	●
Modify system operation rules					
Allow VRE curtailment	●	●	●	●	●
High granularity/closer to real time	●	●	●	●	●
Least-cost dispatch	●	●	●	●	●
Capacity mechanism	●	●	●	●	●
Establish balancing market	●	●	●	●	●
Establish ancillary service market	●	●	●	●	●
Enhance use of interconnection	●	●	●	●	●
Enhance grid capacity and use					
Install stability support devices (STATCOMs, SYNCONs)	●	●	●	●	●
Interconnection/redundancy/mesh	●	●	●	●	●
Reinforcement	●	●	●	●	●
Allow VRE curtailment	●	●	●	●	●
Power flow control	●	●	●	●	●
Steer location of new VRE	●	●	●	●	●
Storage					
Pumped hydro	●	●	●	●	●
Battery energy storage	●	●	●	●	●
Long-duration storage	●	●	●	●	●

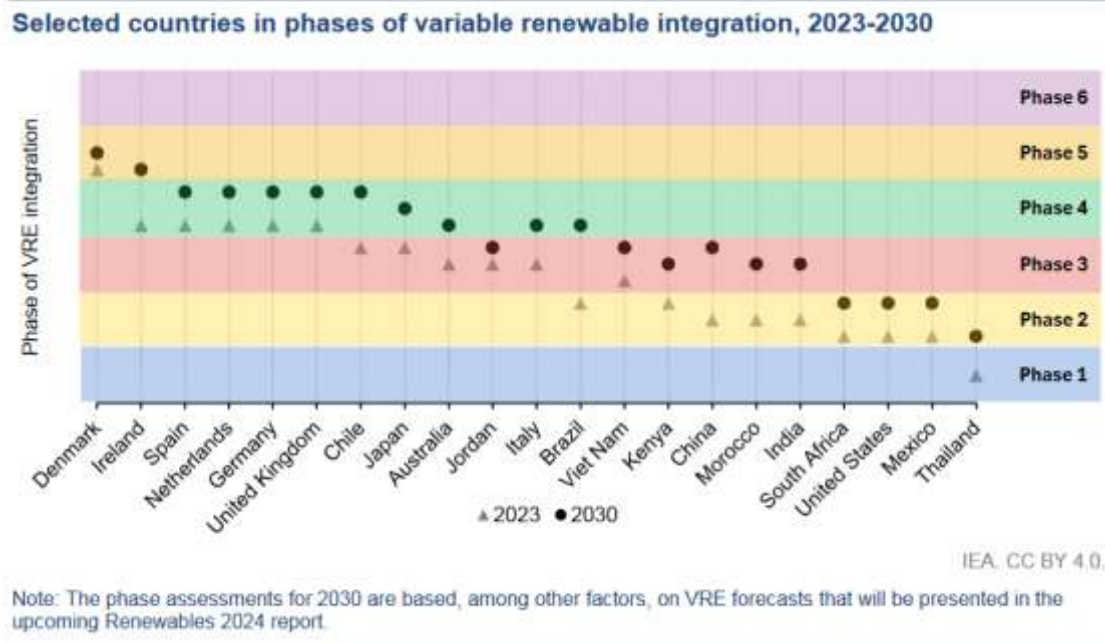
Implementation of measure ● Limited ● Common ● Widespread

Notes: Green = > 80% of systems in the phase have implemented the measure. Yellow = 50-80% of systems in the phase have implemented the measure. Red = < 50% of systems in the phase have implemented the measure. No information could be gathered for Phase 6 as there are no power systems in this phase. Steer location of new VRE = establish dedicated zones for solar PV and wind development, e.g. by applying location network charges, bidding zones or competitive renewable energy zones. Steer location of new demand = e.g. green industrial clusters. There are two reasons for curtailment of wind and solar energy: localised grid reasons (where only a subset of wind/solar generators can contribute to alleviating the problem); and system-wide reasons (where the reduction of any or all wind/solar generators would alleviate the problem).

سیستم های پیشرو نشان داده اند که یکپارچه سازی موثر نیروگاه های تجدیدپذیر در شبکه برق شدنی است

برخی از سیستم های قدرت پیشتاز، امروزه به طور موثر سطوح بالایی از انرژی های تجدیدپذیر متغیر را مدیریت می کنند. سیستم هایی مانند دانمارک، ایرلند، استرالیا، جنوبی و اسپانیا به فاز ۴ یا بالاتر رسیده اند و بسته به سیستم، از ۳۵ تا ۷۵ درصد انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE) را در نسل سالانه خود یکپارچه می کنند. در این سطوح نفوذ، چالش ها در ثبات و

انعطاف‌پذیری در تمام بازه‌های زمانی حادث می‌شوند. این سیستم‌ها اغلب می‌بینند که انرژی‌های تجدیدپذیر متغیر (VRE) بیشتر نسل خود را برای بیش از یک روز پوشش می‌دهد، که نیاز به راه‌حل‌های نوآورانه از نظر عملیات، برنامه‌ریزی و تأمین مالی سیستم برق خود دارد. تجربیات آنها بینش‌های ارزشمندی را برای سیستم‌های دیگر در سراسر جهان با هدف تسریع یکپارچه سازی انرژی‌های تجدیدپذیر متغیر (VRE) ارائه می‌دهد.

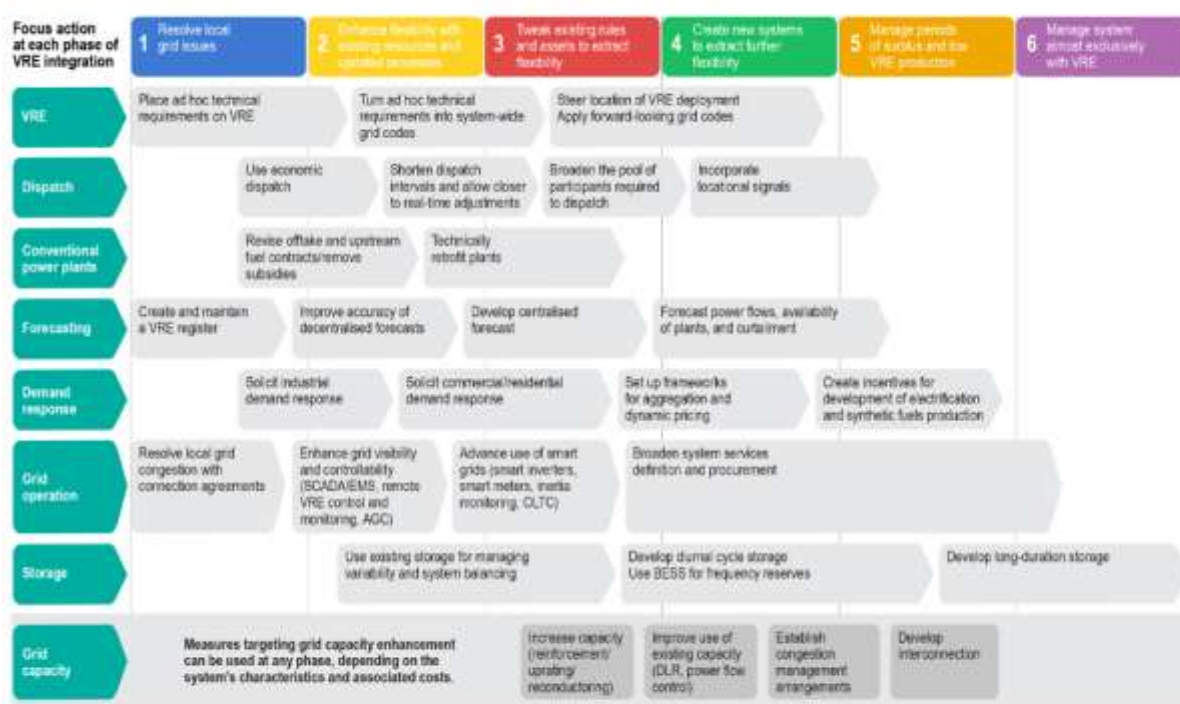


فناوری‌های موجود با موفقیت به مقابله با چالش‌های مرتبط با ادغام سهم‌های بالای انرژی‌های تجدیدپذیر متغیر (VRE) کمک می‌کنند. اکثر راه‌حل‌های فناورانه برای رسیدگی به چالش‌های نوظهور - یعنی تمرکز بیشتر بر ثبات و نیاز فزاینده به انعطاف‌پذیری در تمام بازه‌های زمانی - یا بالغ هستند یا به صورت تجاری در دسترس هستند. کلید راه‌اندازی موفقیت‌آمیز آنها اغلب در سیاست‌گذاری و اقدامات نظارتی مناسب به جای پیشرفت‌های فناوری جدید نهفته است. برای بسیاری از سیستم‌ها، رسیدن به فاز ۴ یا حتی ۵ عمدتاً به استقرار مؤثر فناوری‌های موجود بستگی دارد تا توسعه فناوری‌های جدید. در حالی که برای فاز ۶، فن‌آوری‌های قابل دوام وجود دارد، اما اجرای آنها در مقیاس بزرگ محدود است و نیاز به آزمایش اضافی یا انگیزه‌های اقتصادی برای استقرار دارد.

دستیابی به این سطح از یکپارچگی نیازمند یک تغییر چارچوبی در عملیات سیستم، برنامه‌ریزی و تأمین مالی است. ادغام سهم‌های بالای انرژی‌های تجدیدپذیر متغیر (VRE) مستلزم بازنگری در روش سنتی است که در آن سیستم‌های قدرت عملیاتی، برنامه‌ریزی و تأمین مالی می‌شوند. عناصر اساسی شامل نوسازی شیوه‌های عملیات سیستم، بهبود برنامه‌ریزی استراتژیک و بازنگری چارچوب‌های نظارتی است. طراحی بازار نیز باید تکامل یابد تا ویژگی‌های منحصر به فرد شبکه‌های خورشیدی و بادی تحت سلطه، فناوری‌های جدید و نقش جدید تولید متعارف به‌عنوان ارائه‌دهنده خدمات اساسی سیستم به جای انرژی را در خود جای دهد. این شامل توسعه روش‌های جدید برای تهیه و پاداش دادن به خدمات سیستمی ضروری، حصول اطمینان از حفظ و تکامل آنها در صورت نیاز است.

در حالی که پیشرفت های قابل توجهی توسط سیستم های پیشتاز انجام شده است، امروزه همه پاسخ ها برای سطوح نفوذ بسیار بالای انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE) در آینده وجود ندارد. رشد مستمر و شتابان انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE) در دهه آینده احتمالاً چالش های ادغام جدیدی را آشکار خواهد کرد. اینها ممکن است از سیستم های پیشتاز که به سطوح بی سابقه ای از انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE) می رسند یا از سیستم هایی با شرایط محلی منحصربه فرد که به راه حل های نوآورانه نیاز دارند، ناشی شوند. انتظار می رود بسیاری از سیستم های اضافی - از جمله سیستم های موجود در استرالیا، ژاپن، ایتالیا و برزیل - تا سال ۲۰۳۰ به فاز ۴ یا بالاتر برسند. برای این سیستم ها، تمرکز مداوم بر توسعه اقدامات یکپارچه سازی در حمایت از انتقال امن انرژی بسیار مهم است. برخی از مسائل کلیدی برای سیستم های قدرت با نفوذ انرژی های تجدیدپذیر متغیر (VRE) بسیار بالا حل نشده باقی مانده است. این موضوعات شامل پرداختن به نگرانی های تغییر فصلی، سیستم های عامل با سطوح بسیار بالایی از منابع مبتنی بر مبدل، تضمین سودآوری سرمایه گذاری های جدید در میان افزایش نوسان قیمت و پرداخت مناسب دارایی هایی است که انعطاف پذیری را برای ارزش سیستم آنها فراهم می کند. حل این چالش ها مستلزم همکاری مستمر نوآوری و تعهد سیاست گذاران، رهبران فناوری و محققان در سراسر جهان است.

Focus area of measures by asset or process, by phase of VRE integration



Notes: The proposed set of focus actions by phase represents a timeline of priorities, though specific system contexts may require adjustments to address their particular challenges. AGC = automatic generation control, DLR = dynamic line rating, EMS = energy management systems, OLTC = on-load tap changers, SCADA = supervisory control and data acquisition, VRE = variable renewable energy.

لینک گزارش مرجع:

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/4e495603-7d8b-4f8b-8b60-896a5936a31d/IntegratingSolarandWind.pdf>

ترجمه و تنظیم: مریم صحرا گرد، مهدی تفضلی