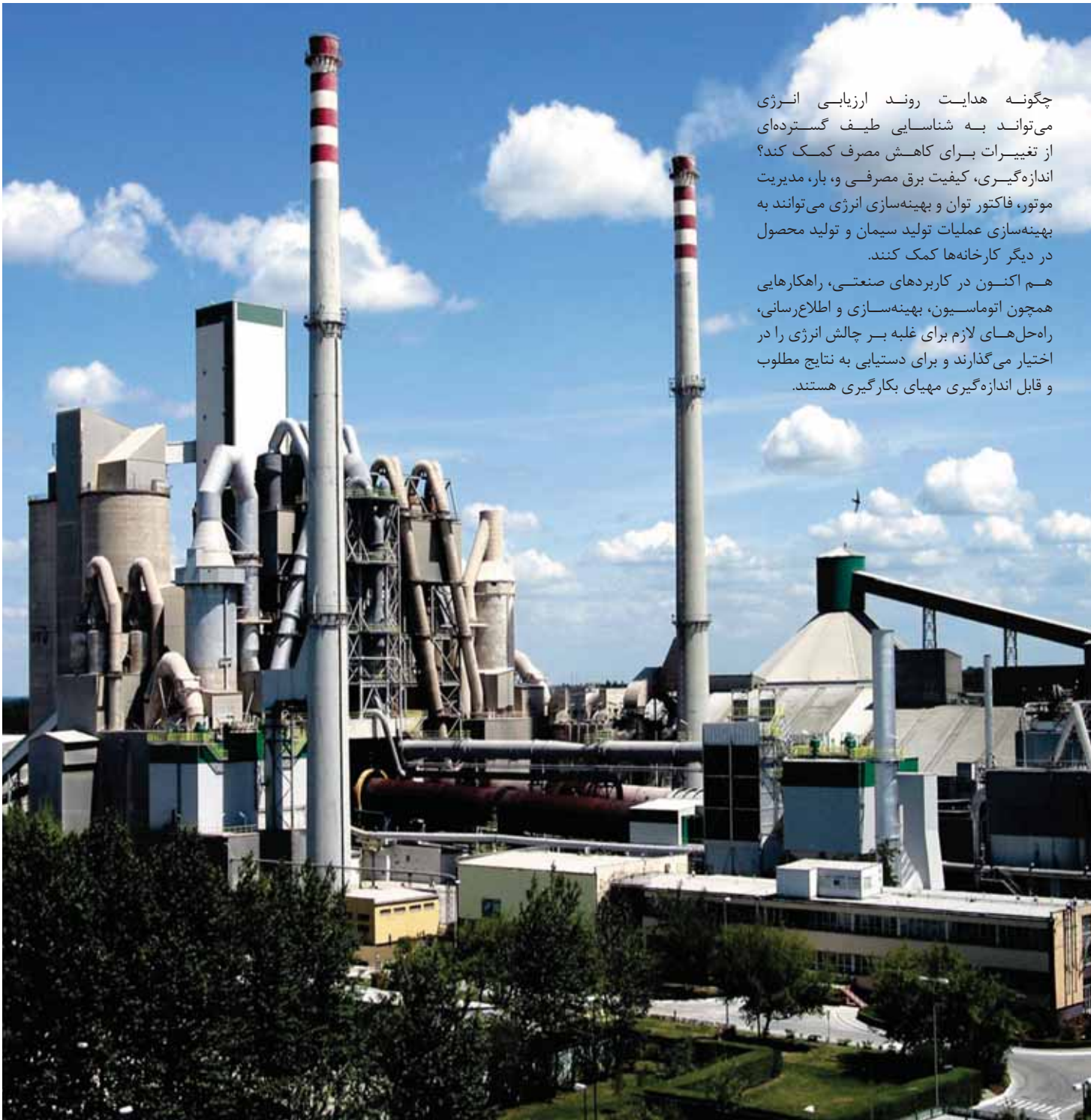
کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی

واژه‌های کلیدی
مدیریت انرژی
ارزیابی انرژی
راه‌کارهای صرفه‌جویی
پلنت تولید سیمان

برگردان: مهندس مهران داوودی



چگونه هدایت روند ارزیابی انرژی می‌تواند به شناسایی طیف گسترده‌ای از تغییرات برای کاهش مصرف کمک کند؟ اندازه‌گیری، کیفیت برق مصرفی و، بار، مدیریت موتور، فاکتور توان و بهینه‌سازی انرژی می‌توانند به بهینه‌سازی عملیات تولید سیمان و تولید محصول در دیگر کارخانه‌ها کمک کنند.

هم اکنون در کاربردهای صنعتی، راهکارهایی همچون اتوماسیون، بهینه‌سازی و اطلاع‌رسانی، راه‌حل‌های لازم برای غلبه بر چالش انرژی را در اختیار می‌گذارند و برای دستیابی به نتایج مطلوب و قابل اندازه‌گیری مهیای بکارگیری هستند.

بنا بر مطالب مندرج در Cement 2009 Plants operations Handbook با ورود کوره‌های فرآیند-خشک[1]، تولیدکنندگان سیمان با افزایش قابل توجه هزینه‌های انرژی روبه‌رو شده‌اند و عملیات کارخانه‌ی سیمان، رکورد میزان متوسط مصرف ۱۰۰ تا ۲۰۰KWh در هر تن سیمان را پشت سر گذاشته است. این چالش پیچیده هم‌زمان با هزینه‌های فزاینده‌ی انرژی و سوخت، تولیدکنندگان سیمان را بر آن داشته است که به منظور کمک به کاهش هزینه‌ها ضمن حفظ قدرت رقابت و افزایش سود، برنامه‌های مدیریت انرژی را اجرا کنند.

بسیاری از تولیدکنندگان سیمان با اتخاذ یک رویکرد همه جانبه‌نگر به مدیریت انرژی صنعتی، هزینه‌های انرژی را تا ٪۲۰ پایین آورده‌اند. این فرآیند راهبردی به تولیدکنندگان کمک می‌کند تا تمهیدات صرفه‌جویی در هزینه را شناسایی کنند و نیز مناسب‌ترین ابزارها برای پاسخگویی به نیازهای ویژه‌ی کارخانه در امر کاهش مصرف انرژی را که شامل موارد زیر می‌شود، بیابند:

- سامانه‌های مدیریت برق و دیگر انرژی‌ها؛
- راه‌اندازهای فرکانس متغیر؛
- سامانه‌های کنترل مدل پیشبین[2]؛
- ارزیابی انرژی.

این ابزارها در زمینه‌های زیر به تولیدکنندگان سیمان کمک می‌کنند:

- یافتن و حذف ناکارایی‌های عملیاتی؛
- تغییر تجهیزات و فرآیندها؛
- بکارگیری روال‌های کارایی انرژی در طراحی تولید؛
- توسعه‌ی عملیات کارخانه به منظور گنجاندن برنامه‌های گسترده‌ی مدیریت انرژی که به سرعت منجر به نتایج قابل اندازه‌گیری و صرفه‌جویی قابل توجه هزینه می‌شوند.

این دوران، دورانی با پیچیدگی بی‌سابقه برای تولیدکنندگان سیمان است. مدیریت تولید، همزمان با متعادل کردن تدارکات، قیمت‌گذاری، تقاضا، کارایی فرآیندها، تبعیت از مقررات و دیگر الزامات، کاری دشوار است. همزمان، هزینه‌های فزاینده‌ی انرژی شامل منابع آب و هوا، گاز، برق و بخار[3] (WAGES) این چالش‌ها را تشدید می‌کند. چنان که paul Scheihing مدیر تولید برنامه‌ی فناوری‌های صنعتی دپارتمان انرژی آمریکا شرح می‌دهد: «هزینه‌ی خرید انرژی مورد نیاز برای تولید توسط یک تأسیسات صنعتی به عنوان ورودی مدیریت شده در نظر گرفته می‌شود و به طور قابل ملاحظه مورد توجه قرار می‌گیرد، در حالی که استفاده از آن انرژی در کارخانه اغلب اوقات به سادگی به عنوان هزینه‌ی کسب و کار در نظر گرفته می‌شود. اگرچه این امر در همه‌ی تأسیسات صنعتی درست نیست، اما تجربه نشان داده که کارایی انرژی این تأسیسات به طور قابل ملاحظه از آن‌چه می‌توانست باشد کمتر است، مگر آن که مصرف انرژی به طور فعال در پلنت مدیریت شود و طرح مستندی برای این کار وجود داشته باشد. بدون وجود شاخص‌های عملکرد که مصرف انرژی را به خروجی تولید شده ربط دهند، اندازه‌گیری یا مستندسازی بهبود جریان انرژی، دشوار است.»

برای نخستین بار در کاربردهای صنعتی، راه‌کارهایی همچون کنترل اتوماسیون، بهینه‌سازی و اطلاع‌رسانی، راه‌حل‌های لازم برای غلبه بر چالش انرژی را در اختیار می‌گذارند و برای دستیابی به نتایج مطلوب و قابل اندازه‌گیری مهیای بکارگیری هستند.

ارزیابی انرژی

پیش از اجرای هر برنامه‌ی مدیریت انرژی، ارزیابی وضعیت انرژی می‌تواند به شرکت‌ها کمک کند تا طیف گسترده‌ای از تغییرات را که با اجرای آن‌ها می‌توانند به کاهش مصرف انرژی کمک کنند، شناسایی نمایند. این تغییرات می‌تواند ساده باشد مانند قدم زدن در یک ساختمان یا تأسیسات برای شناسایی نقاط تلف کننده‌ی انرژی یا تلاش‌هایی با جزییات بیش‌تر. ارزیابی می‌تواند به ترسیم چشم‌انداز فعالیت برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی، تعریف شاخص‌های کلیدی و فراهم آوردن منابع برای رسیدن به یک نگرش همه جانبه از وضعیت انرژی کل سازمان، کمک کند.

توصیه‌های منتج از این ارزیابی ممکن است شامل تغییرات رفتاری کم هزینه یا بدون هزینه باشد؛ مانند تغییر زمان عملیات نگهداری به زمان‌های خلوت‌تر، یا ممکن است شامل تغییراتی باشد که نیاز به کار بیش‌تری دارند مانند برنامه‌ریزی برای تغییر تجهیزات. ارزیابی و الویت‌بندی فرصت‌های اساسی پیشرفت نیز می‌تواند در تحلیل‌ها گنجانده شود.

پایش انرژی

پس از مرحله‌ی ارزیابی، نخستین گام در جهت مدیریت مصرف انرژی، آگاهی یافتن از الگوها و گرایش‌های مصرف انرژی در تأسیسات است. کارکنان مدیریت تأسیسات می‌توانند به منظور گردآوری اطلاعات درباره‌ی همه‌ی منابع انرژی در ارتباط با استفاده از تجهیزات و شرایط محیطی، بر زیرساخت اندازه‌گیری تأسیسات شامل دستگاه‌های پایش قدرت، سابقه‌ی صورتحساب‌ها و ارزیابی‌های قبلی انرژی و فرآیندها، تأثیر بگذارند.

این فرآیندها باید شامل تمامی نقاطی شود که در آن‌ها انرژی مصرف می‌شود، از فرآیندهای صنعتی تا سامانه‌های حساس ساختمان. سپس این اطلاعات در یک نرم‌افزار زمان‌بندی انرژی، ثبت و تاریخ‌گذاری می‌شود تا گرایش‌ها یا ناسازگاری‌های بین کیفیت انرژی و مصرف و نیز زمانبندی‌های پیشرفت‌های آینده، معین شوند. با این تصویر بزرگ از مصرف کلی WAGES تأسیسات، کارکنان مدیریت تأسیسات می‌توانند تغییرات لازم برای کمک به کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های مرتبط با آن را شناسایی و سپس عملیاتی کنند.

اندازه‌گیری انرژی

نخستین گام، اندازه‌گیری واحدهای تأسیسات اصلی ورودی و تقسیم پلنت به مراکز تخصیص انرژی[4] (EAC) است. تولیدکنندگان باید دستگاه‌های اندازه‌گیری برق را در واحدهای زیر نصب کنند:

- ژنراتورها؛
- پست‌های فرعی کارخانه؛
- کوره‌ها؛
- موتورهای بالاتر از ۲۰۰ hp؛
- مصرف کنندگان عمده‌ی برق در هر EAC.

برای سوخت‌های فسیلی، تولیدکنندگان می‌توانند از الگوی اندازه‌گیری زیر استفاده کنند:

- کنتورهای اصلی گاز ورودی؛
- کوره‌ها؛
- مصرف کنندگان عمده‌ی گاز.

نظارت بر تجهیزات تولید، همچنین اطلاعاتی درباره‌ی چگونگی مصرف انرژی توسط دستگاه‌های مشخص در اختیار می‌گذارد. نقاط مفید در میان تجهیزات و فرآیندها را برای گردآوری داده‌ها شناسایی می‌کند و سامانه‌ی انفورماتیک را برای نگهداری و تحلیل این داده‌ها برنامه‌ریزی می‌کند.

تعیین الگوهای مصرف

جدول‌های تعیین الگوهای مصرف انرژی توسط اندازه‌گیری و ثبت مصرف انرژی و برای شناسایی دوره‌های اوج تقاضا و مرتبط ساختن مصرف با فعالیت‌های تأسیسات و تولید در زمان واقعی و نیز پیش‌بینی تقاضا برای انرژی صورت می‌گیرد.

نظارت بر کیفیت برق

گردآوری و بازنگری اطلاعات مربوط به کیفیت برق می‌تواند به شناسایی ناهنجاری‌های سامانه‌ی قدرت و محاسباتی مانند هزینه‌ی موارد قطع برق کمک کند. نظارت بر کیفیت برق پارامترهای کیفیت قدرت از قبیل هارمونیک‌ها و انحرافات ولتاژ را اندازه‌گیری می‌کند، نمایش می‌دهد، ضبط می‌کند، جهت می‌دهد و هشدار می‌دهد.

1. Dry-process
2. Model predictive control
3. Water, Air, Gas, Electric and Steam
4. Energy allocation centers

با داشتن سابقه‌ی اطلاعات، کارکنان مدیریت تأسیسات می‌توانند مسایل مربوط به کیفیت برق را شناسایی کنند، مسایلی مانند افت ولتاژ یا هارمونیک‌ها که می‌توانند به تجهیزات درون کارخانه آسیب بزنند و موجب بروز مشکلات عامل قدرت در شبکه‌ی انرژی شوند. با شناخت این ریسک‌ها تولیدکنندگان می‌توانند از تجهیزات خود بهتر محافظت کنند و از هزینه‌ی جریمه‌های شرکت‌های ارایه دهنده‌ی خدمات بپرهیزند.

ارتقای کارایی

سپس، تولیدکنندگان سیمان می‌توانند راهبردهای کنترل را اجرا کنند، مانند کاهش بار اضطراری سهمیه‌بندی هزینه‌ها، و از مدیریت بخواهند که به ارتقای کارایی انرژی در کارخانه کمک کند.

کاهش بار اضطراری

هزینه‌ی یک سامانه‌ی کاهش بار اضطراری در مقایسه با هزینه‌ی از دست رفتن تولید در صورت وقوع قطع برق، که با استفاده از داده‌های گردآوری شده در جریان ارزیابی‌های گذشته معین شده، به آسانی توجیه می‌شود. بیش‌تر تولیدکنندگان سیمان بر این نظرند که هزینه‌ی یک سامانه‌ی کاهش بار اضطراری، در یک یا دو بار قطع برق جبران می‌شود.

کاهش بار اضطراری برای کمک به تولیدکنندگان در موارد زیر در سایت‌هایی که برق تولید می‌کنند یا منابع چندگانه دارند، به کار می‌رود:

- محافظت از ژنراتورها در برابر افزایش بار خطرناک و آسیب زننده؛
- حفظ بار ضروری هنگام قطع برق؛
- بهینه‌سازی منابع و بارهای ضروری؛
- حذف هزینه‌های مربوط به تجهیزات آسیب دیده و زمان خاموشی.

مصرف انرژی، سهمیه‌بندی هزینه‌ها، فاکتور مجازی

تولیدکنندگان سیمان با استفاده از داده‌های گردآوری شده مربوط به مصرف انرژی، می‌توانند بگویند داده‌های انرژی کجا و با چه نسبتی مصرف شده است. این می‌تواند به سهمیه‌بندی هزینه‌ها بر حسب دپارتمان، فرآیند، یا تأسیسات کمک کند؛ دقت صورتحساب‌های منابع انرژی را از طریق «فاکتورهای مجازی» کنترل کند، و نرخ‌ها و قراردادهای جایگزین را بررسی نماید.

مدیریت تقاضا

یک سامانه‌ی مدیریت تقاضا از طریق راهبردهای کاهش بار و تقلیل نقاط اوج، تقاضا برای انرژی را محدود می‌کند. این سامانه به کاهش تقاضا برای بار کمک می‌کند و خرید برق در زمان واقعی را مدیریت می‌کند و در یک دوره‌ی محدودیت، بار را به حداقل می‌رساند.

برای مثال یک کارخانه‌ی فولاد ۹۰ هزار مگاوات ساعت انرژی الکتریکی در ماه با هزینه‌ی ۲/۷ میلیون دلار در سال مصرف می‌کرد. با جایگزین کردن سامانه‌ی مدیریت تقاضای غیرقابل اعتماد تأسیسات و به‌روز کردن الگوریتم‌های کنترل برای کاهش بار با کارایی بیش‌تر، ارتقای عامل قدرت، و کاهش افت ولتاژ، ۳۰۰ هزار دلار هزینه‌ی سامانه، در ۵ ماه کاملاً جبران شد. به علاوه کاهش سطح آسیب‌ها موجب شد که شرکت ۷۰ هزار دلار در ماه صرفه‌جویی کند.

مدیریت موتور

نزدیک به ۷۰ درصد کل برق مصرفی در صنعت، در انواع سامانه‌هایی که با موتور حرکت می‌کنند، مصرف می‌شود. در یک دوره‌ی عمر ۱۰ ساله، هزینه‌ی انرژی یک موتور می‌تواند به ۱۰۰ برابر ارزش اولیه‌ی آن در زمان خرید برسد.

البته تولیدکنندگان سیمان با استفاده از راه‌حل‌های کنترل هوشمند موتور مانند راه‌اندازهای فرکانس متغیر (VFD_s)، می‌توانند مصرف انرژی موتور را به طور چشم‌گیری کاهش دهند.

در کارخانه‌های سیمان VFD ها برای صرفه‌جویی در انرژی، کنترل پارامترهای فرآیند و زمان‌های ابقا[1] در برنامه‌های کاربردی با مشخصات گشتاور متغیر مانند جریان گاز یا جریان مایع یا در برنامه‌های با گشتاور ثابت مانند جابه‌جایی مواد و تجهیزات خرد کردن، استفاده می‌شوند. از این راه‌اندازها همچنین برای تأمین نیروی نورد آسیاب برای خرد کردن مواد مورد استفاده در سیمان و نیز برای راه انداختن و کار کردن آسیاب‌های نوردی، آسیاب‌های توپی و نقاله‌های زمینی استفاده می‌شود.

یک کارخانه‌ی سیمان که مرکز آن در چین است با استفاده از VFDها مصرف انرژی کوره‌های فرآیند خشک خود را به طور چشم‌گیری کاهش داد، کوره‌هایی که سالانه ۱/۴ میلیون تن سیمان تولید می‌کنند. سامانه‌های سنتی کنترل هواکش مقدار ثابتی انرژی مصرف می‌کردند، به این ترتیب هواکش‌ها در کارخانه، همواره با حداکثر ظرفیت کار می‌کردند، حتی زمانی که کارخانه محصول تولید نمی‌کرد. به این ترتیب انرژی به هدر می‌رفت و تجهیزات دچار استهلاک بیهوده می‌شدند. با استفاده از راه‌اندازهای فرکانس متغیر برای خودکار کردن کنترل سرعت فن دودکش خروجی کوره، فن الکتریکی اصلی کوره، فن دمای بالا، فن خروجی آسیاب زغال سنگ، و فن‌های خروجی انتهای کوره، اکنون سامانه فقط انرژی لازم برای تولید جریان هوای تعیین شده را مصرف می‌کند. یکی از نتایج استفاده از VFDها کاهش ۱۰ درصدی مصرف انرژی و صرفه جویی ۱۲۴ هزار دلار در سال توسط شرکت بود.

کاربردهای VFD در یک کارخانه‌ی سیمان شامل این موارد است:

- فن‌های Induced draft یا forced draft؛
- راه‌اندازهای کوره؛
- راه‌اندازهای آسیاب؛
- سامانه‌های جابه‌جایی مواد؛
- پمپ‌ها و فن‌های سانتریفوژ؛
- کنترل‌های کمپرسور.

فاکتور توان

فاکتور توان[2] (PF) میزان خوب مصرف کردن توان گرفته شده از شبکه توسط تولیدکنندگان سیمان را اندازه‌گیری می‌کند.

اگر مقدار PF برابر با ۱ باشد به معنی کارآیی ۱۰۰٪ است. به عبارت دیگر، همه‌ی قدرت گرفته شد، مصرف شده است.

PF برابر با صفر به این معنی است که یک جریان کاملاً بازگشتی قدرت وجود دارد.

برای ارتقای عامل قدرت، شرکت‌ها می‌توانند از VFDها استفاده کنند، از موتورهای سنکرون (که به‌طور ساختاری PF برابر با ۱ دارند) استفاده کنند، یا خازن‌های تصحیح کننده‌ی فاکتور توان نصب کنند. خازن‌های تصحیح‌کننده‌ی فاکتور توان برای ارتقای فاکتور توان ضعیف موتورهای القایی به کار می‌روند.

بهینه‌سازی کارآیی

پس از این که تولیدکنندگان سیمان از فرصت‌های ارتقای کارآیی را بهره گرفتند، مرحله‌ی بعدی

1. Retention times

2. Power factor

فرا می‌رسد که بررسی فرصت‌های موجود برای بهینه‌سازی کل فرآیند است. در واقع کنترل مؤثر یک واحد فرآیند عمده معمولاً به معنی اداره کردن سامانه‌های چندمتغیره است. اما بسیار نامحتمل است که اداره کردن هر چرخه‌ی کنترل به طور مستقل بتواند به کنترل بهینه منجر شود، زیرا در بیش‌تر موارد، کنترل کردن یک چرخه، بر سایر چرخه‌ها تأثیر می‌گذارد. فناوری کنترل مدل پیش‌بین(MPC) یک الگوریتم کنترل چندمتغیره است که می‌تواند امکانات زیر را در اختیار بگذارد:

- مدل دینامیک فرآیند درونی که محدودیت‌ها را پردازش می‌کند و بر مبنای یک سیکل فرکانس ثابت کار می‌کند؛
- تاریخچه از حرکت‌های کنترلی گذشته برای تعیین انحرافات؛
- یک عملگر بهینه‌ساز هزینه بر دامنه‌ی پیش‌بینی شده برای محاسبه‌ی حرکت‌های کنترلی بهینه و کنترل کردن رفتار آینده‌ی سامانه.
- فناوری MPC به کنترل‌کننده امکان می‌دهد درباره‌ی شرایط عملیاتی جاری فرآیند، اطلاعات دریافت کند. سپس از یک مدل استفاده می‌کند تا پاسخ فرآیند به یک رشته حرکت‌های آینده را پیش‌بینی کند، حرکت‌هایی که به صورت داده‌های ورودی بر یک دامنه‌ی زمانی تعیین شده به نام «افق پیش‌بینی»، شبیه‌سازی شده‌اند. سپس یک مسأله‌ی کنترلی بهینه، که به‌طور هم زمان حل شده، بهترین رشته‌ی حرکت‌های آینده را در متغیرهای چندگانه‌ی شبیه‌سازی شده تعیین می‌کند تا یک عملکرد هدف مشخص، کمینه شود، در حالی که از محدویت‌های متنوع فرآیند تبعیت می‌کند. سپس بخشی از مسیر کنترلی به دست آمده به فرآیند اِعمال می‌شود. اندازه‌گیری‌های جدید فرآیند که نشان‌دهنده‌ی شرایط تغییر یافته‌ی عملیاتی هستند، اجازه می‌دهند که خروجی‌های فرآیند با مسیرهای مرجع مطلوب مقایسه شوند. با این اطلاعات جدید، سامانه، عمل بهینه‌سازی و فرآیند حرکات کنترلی را تکرار می‌کند.

سامانه‌های MPC می‌توانند بخش‌های کلیدی فرآیند تولید را از طریق کاربردهایی برای آماده‌سازی مواد خام شامل فرآوری pyro ، آسیاب سیمان، و مخلوط کردن مواد، بهینه‌سازی کنند. همچنین، بهینه‌سازی فرآیند احتراق، کنترل دما، بهینه‌سازی فرآیند بازیافت گرما و موارد دیگر می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در انرژی شود.

سامانه‌های MPC، به طور متوسط به کارخانه‌های سیمان امکان می‌دهند تا مصرف انرژی خود را ۳ تا ۵ درصد کاهش دهند و نیز ظرفیت و کیفیت تولید خود را ارتقا بخشند.

سود مدیریت انرژی

تولیدکنندگان مجهز به اطلاعات تولید بهینه‌سازی شده، سپس می‌توانند پیش‌بینی کنند برای بار و پیمانه‌های مشابه، چقدر انرژی مورد نیاز خواهد بود. به این ترتیب تولیدکنندگان سیمان می‌توانند انرژی مورد نیاز را در برنامه‌ریزی منابع و زمان‌بندی تصمیم‌گیری بگنجانند، همان‌طور که آماده بودن مواد خام یا دیگر ورودی‌ها را در صورتحساب مواد در نظر می‌گیرند. به طور تجربی، لحاظ کردن نیازهای مصرفی WAGES در صورت حساب مواد و مصالح به مدیر کارخانه یا مدیر زمان‌بندی تولید اجازه می‌دهد در مورد تولید، تصمیمات مبتکرانه بگیرد و سرمایه‌گذاری انرژی را بهتر مدیریت کند تا بازدهی بیشتری داشته باشد. به عنوان مثال با دانستن این که برخی انواع سیمان به منابع طبیعی بیشتری نیاز دارند، مدیران می‌توانند این انواع را خارج از محدوده‌های پر ازدحام قرار دهند.

در وضعیت کنونی فرآیند مدیریت انرژی صنعتی، انرژی و گازهای گل‌خانه‌ای مربوط به آن، دیگر بخشی غیرقابل اجتناب از هزینه‌های ثابت، هستند. تولیدکنندگانی که منابع WAGES را به صورت حساب مواد و مصالح، اضافه می‌کنند، می‌توانند آن را به طور فعال مدیریت کنند تا به سودآوری بالاتری دست یابند. به علاوه، این اطلاعات به دست آمده در سطح واحد مصرف انرژی، ورودی ارزشمندی برای جدول‌های تداوم پذیری و دیگر سازوکارهای گزارشده‌ی خواهد بود، که به شرکت‌ها اجازه می‌دهد کل زنجیره‌ی تدارکات خود را بهتر بهینه‌سازی کنند تا موجب تقویت برنامه‌های انرژی و تداوم‌پذیری آن شوند.

به عنوان مثال در آینده در کارخانه‌ی سیمان، ممکن است یک تولیدکننده بخواهد عملیات را به گونه‌ای تقویت کند تا از یک «حدنصاب تداوم‌پذیری» ایده‌آل حمایت کند. شرکت باید یک تأسیسات تولید انتخاب کند بر مبنای قیمت دوغاب و نیز ذغال سنگ یا انرژی لازم برای انتقال مواد خام به تأسیسات. افزون بر این راه‌های حمل و نقل محصول تولید شده نیز می‌تواند بهینه‌سازی شود تا عوامل آب و هوایی که می‌توانند بر انرژی لازم برای نگهداری محصول تأثیر بگذارند نیز به حساب آیند.

مدیریت انرژی همه جانبه نگر

تولیدکنندگانی که این رویکرد همه جانبه نگر را در مدیریت انرژی اتخاذ کرده‌اند با تکیه بر اتوماسیون موجود و سرمایه‌گذاری در سامانه‌ی تأمین توان به منظور استفاده‌ی بهتر از منابع WAGES، در این امر موفق شدند. بهره‌گیری از راه‌حل‌های اتوماسیون هوشمند به ایجاد تصویری از مصرف انرژی، در یک کارخانه‌ی سیمان کمک می‌کند تا بفهمیم در چه جاهایی تغییرات عملیاتی می‌توانند صورت گیرند تا مصرف انرژی و هزینه کاهش یابد.

مفهوم کلیدی: قوانین بستگی

اندکی سرعت کمتر، انرژی بسیار کمتر

VFDها قوانین بستگی را به کار می‌گیرند تا مصرف انرژی را با استفاده از کمترین میزان مورد نیاز موتور، کاهش دهند. به عنوان مثال در کاربردهای سانتریفوژ، مانند فن‌ها و پمپ‌ها، کاهش سرعت به کاهش جریان منجر می‌شود (فشار متناسب با مجذور سرعت تغییر می‌کند). کاهش سرعت به کاهش مصرف انرژی نیز منجر می‌شود (قدرت متناسب با مجذور سرعت تغییر می‌کند). بنابراین، نرخ جریان ۵۰ درصد برابر است با قدرت مورد نیاز ۱۲/۵ درصد، به عبارت دیگر سرعت فن به ۸۰ درصد معادل است با ۵۰ درصد کاهش در مصرف انرژی.