



Business Data Analytics

Descripción técnica

Reto 11

3rd year.. 2025-2026

Cliente

La empresa se enmarca en la investigación y el desarrollo de sistemas y soluciones de próxima generación para sus clientes. Su infraestructura les permite producir prototipos y lotes de pequeño tamaño para la verificación de sistemas y componentes.

Las exigencias impuestas a los productos y procesos de producción aumentan constantemente y los retos incluyen la creciente flexibilidad de los procesos de producción, la alta calidad de los procesos, la creciente miniaturización y personalización de productos y sistemas ante la reducción de los plazos de desarrollo, el ahorro de recursos en la producción y una integración mucho más eficiente de los procesos de desarrollo y producción.

La mecatrónica -fusión inteligente de informática, mecánica y electrónica- es el fuerte de la empresa. Los conocimientos específicos que poseen sus empleados constituyen la base de las colaboraciones en investigación y desarrollo y los cimientos para diseñar sistemas inteligentes, conectados en red o autónomos para la industria manufacturera.

Descripción técnica

La transformación digital de los procesos industriales y la introducción del concepto de Industria 4.0 han abierto un amplio abanico de oportunidades en los entornos de fabricación. Esta revolución más reciente pretende adaptarse a las necesidades y la variabilidad de los procesos de producción para aumentar la eficiencia en la asignación de recursos. La digitalización de la fabricación significa que podemos reducir el tiempo de comercialización; aumentar la flexibilidad de los procesos, la calidad de los productos y la eficiencia energética; y mejorar la seguridad de nuestras redes industriales. Todo ello se traduce en una reducción de costes y un entorno industrial más sostenible.

En los sistemas del mundo real, muchos problemas de optimización se deben a objetivos contrapuestos que se desean optimizar simultáneamente. Por lo general, estos problemas no tienen una solución única, y "resolverlos" requiere encontrar varias soluciones.

La figura 1 presenta la sección transversal de un accionamiento eléctrico con un estator ranurado con bobinas concentradas y un rotor interior con imanes permanentes enterrados. También se presentan algunos de los parámetros geométricos de este conjunto (e.g., d_{si} ; b_{st} ; b_{ss} , etc.). Dependiendo del objetivo real del diseño, es necesario variar algunos de estos parámetros para conseguir un motor rentable que muestre un buen comportamiento operativo. El vector de parámetros de diseño correspondiente tiene un tamaño de 6 y viene dado por:

$$x = (h_m, \alpha_m, e_r, d_{si}, b_{st}, b_{ss})$$

donde todos los parámetros se ilustran en la Figura 1 excepto α_m , que denota la relación entre el tamaño real del imán y el tamaño máximo posible del imán como resultado de todos los demás parámetros geométricos del rotor.

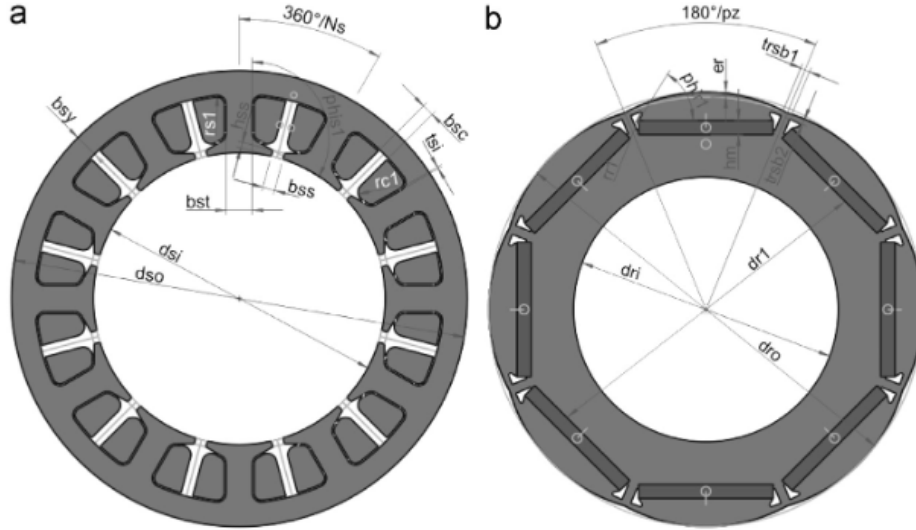


Figure 1: Dimensiones geométricas del estator y el rotor para una topología de rotor interior con imanes incrustados. (a) Estator. (b) Rotor. A.-C. Zăvoianu et al.

En nuestro problema, la meta es optimizar simultáneamente cuatro objetivos sin restricciones, es decir, $m=4$:

- $o1(x) = -\eta_{ed}(x)$ – donde $\eta_{ed}(x)$ es la eficiencia del accionamiento eléctrico. Dado que hemos formulado nuestro MOOP como un problema de minimización, la opción más sencilla es minimizar los valores de eficiencia negados.
- $o2(x) = T_{cogPP}(x)$ – el valor pico a pico del par motor para la excitación sin corriente. Este parámetro muestra el comportamiento del accionamiento eléctrico en funcionamiento sin carga y debe ser lo más pequeño posible para minimizar el ruido y las vibraciones que son el resultado de las fluctuaciones de par.
- $o3(x) = TC(x)$ – el coste global de los materiales necesarios para construir el motor. Minimizar este objetivo es una tarea habitual en la mayoría de los MOOP de accionamiento eléctrico que tratamos.
- $o4(x) = T_{rippPP}(x)$ –equivalente a $T_{cogPP}(x)$ en funcionamiento con carga. Los valores de este objetivo también deben ser lo más pequeños posible.

La forma de calcular los valores objetivo es mediante simulaciones que llevan mucho tiempo. Disponemos de datos de algunas simulaciones, pero, debido al elevado coste de hacer simulaciones, no podemos realizar otras nuevas. Por lo tanto, debemos utilizar sólo las disponibles y aproximarnos a las posibles nuevas simulaciones que podamos necesitar.

Una vez seleccionadas las "7 mejores" soluciones de diseño del motor según determinados algoritmos evolutivos multiobjetivo, se crean prototipos y se prueban en un banco de pruebas para garantizar que cumplen los requisitos técnicos necesarios.

El motor se hace funcionar en diferentes condiciones para seleccionar las que minimizan la potencia consumida por el motor. anomalías en el comportamiento del motor. Sin embargo, la selección de tales condiciones requiere demasiado tiempo.

El aprendizaje por refuerzo (RL) es un subcampo del aprendizaje automático (ML) que aborda el problema del aprendizaje automático de decisiones óptimas a lo largo del tiempo. Proponemos seleccionar las condiciones que cumplen el requisito de potencia mínima utilizando esta técnica de ML.

En este contexto de optimización y mejora del rendimiento de los motores eléctricos, no solo es crucial minimizar el consumo energético, sino también garantizar la fiabilidad de los componentes mecánicos. Un elemento clave en este aspecto son los rodamientos, cuya degradación puede afectar significativamente al comportamiento del sistema. Para automatizar el proceso han instalado una serie de sensores en sus máquinas de producción.

En la Figura 2 se puede consultar un esquema del set up experimental propuesto para la detección de fallos en los rodamientos. Los procesos productivos están compuestos por activos de producción de la empresa. Los activos son sensorizados para obtener datos generados durante el proceso, los sensores instalados son (i) 3 acelerómetros monoaxiales IMI con referencia 601A01 para medir las vibraciones producidas en direcciones axial, tangencial y radial bajo boladizo (ii) un acelerómetro triaxial IMI con referencia 604B31 para medir las vibraciones producidas en direcciones axial, tangencial y radial sobre boladizo. (iii) Un micrófono SM81 y (iv) un tacómetro analógico MT-190.

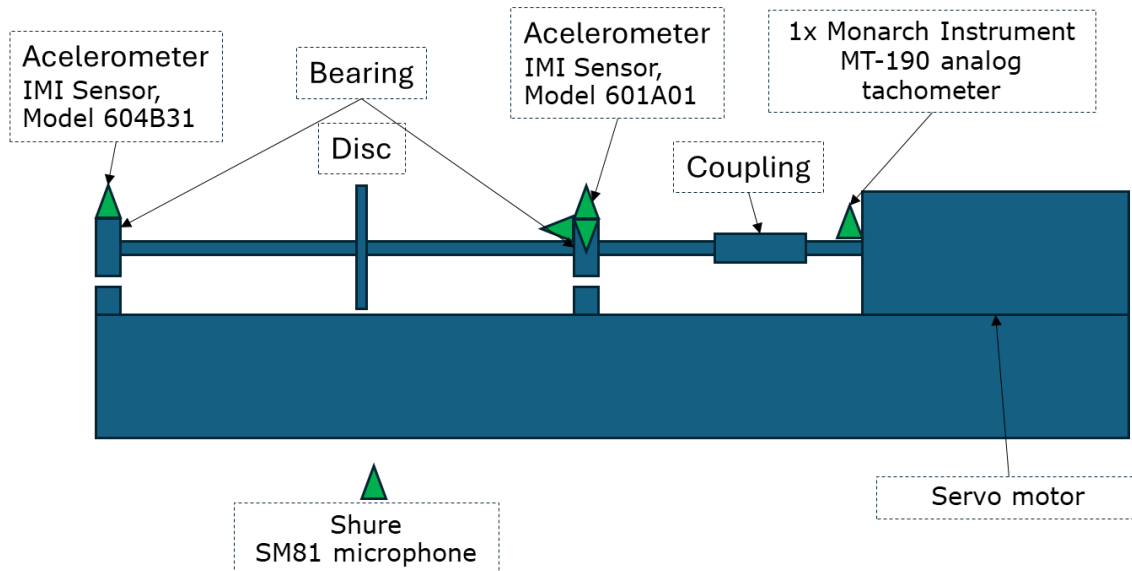


Figura 1: Esquema del set-up experimental propuesto para la adquisición de señales durante diferentes condiciones operativas de rodamientos.

El dataset incluye fallos de rodamientos (i) no defectuosos, de desequilibrio, de desalineación horizontal y vertical, de bolas, de anillo interior y de anillo exterior. El montaje experimental incluye un motor eléctrico de 1/4 CC con 700-3600 rpm, dos cojinetes y un rotor de 15,24 cm de diámetro. La longitud del eje del montaje es de 520 mm. La distancia entre los rodamientos es de 390 mm. Cada rodamiento contiene 8 elementos rodantes (bolas) donde cada bola tiene 0,7145 cm de diámetro. El diámetro de la jaula de los rodamientos es de 2,8519 cm.

Nota: La frecuencia de muestreo del sistema de adquisición es de 51.2 kHz

En total, hay 1951 series temporales multivariantes. Las mediciones se realizan teniendo en cuenta la gravedad del fallo para obtener diferentes escenarios. La Figura 2 muestra un modelo general de un rodamiento en buen estado.

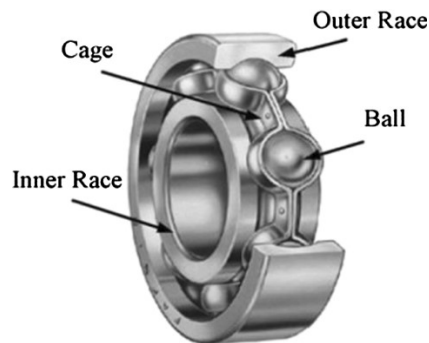


Figura 2: Modelo general de un rodamiento

Descripción de las clases

Funcionamiento normal: esta clase representa el sistema que funciona en condiciones normales sin ningún fallo. Incluye un conjunto de 49 escenarios distintos, cada uno con una velocidad de rotación fija dentro del intervalo de 737 rpm a 3686 rpm con pasos de aproximadamente 60 rpm.

Desequilibrio: para simular distintos grados de funcionamiento desequilibrado, se acoplaron al rotor distintos valores de carga de 6 g, 10 g, 15 g, 20 g, 25 g, 30 g y 35 g. Para cada valor de carga inferior a 30 g, la frecuencia de rotación asumida en los mismos 49 valores empleados en el caso de funcionamiento normal. Sin embargo, para cargas iguales o superiores a 30 g, la vibración resultante hace impracticable que el sistema alcance frecuencias de rotación superiores a 3300 rpm, lo que limita el número de frecuencias de rotación distintas a sólo 44 en estos casos. Así pues, la base de datos incluye un total de 333 escenarios diferentes de funcionamiento en desequilibrio.

Desalineación paralela horizontal: este tipo de fallo se indujo en el MFS desplazando el eje del motor horizontalmente 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm y 2,0 mm. Utilizando el mismo rango para la frecuencia de rotación que en el funcionamiento normal para cada desplazamiento horizontal, se consideraron un total de 197 escenarios diferentes para esta clase de fallo.

Desalineación paralela vertical: este fallo se indujo en el MFS desplazando el eje del motor verticalmente 0,51 mm, 0,63 mm, 1,27 mm, 1,4 mm, 1,78 mm y 1,9 mm. Utilizando el mismo rango para la frecuencia de rotación que en el funcionamiento normal para cada desplazamiento vertical, se consideraron un total de 301 escenarios diferentes para esta clase de fallo.

Fallos en los rodamientos: al ser uno de los elementos más complejos de la máquina, los rodamientos son los elementos más susceptibles de sufrir fallos.

El fabricante ABVT proporcionó tres rodamientos defectuosos (Figura 3), cada uno con un elemento defectuoso distinto (pista exterior, elementos rodantes y pista interior), que se colocaron de uno en uno en dos posiciones distintas en el soporte experimental MFS: entre el rotor y el motor (posición bajo voladizo), o en la posición exterior, teniendo el rotor entre el rodamiento y el motor (posición sobre voladizo).

Los fallos de los rodamientos son prácticamente imperceptibles cuando no hay desequilibrio. Así pues, se añadieron tres masas de 6 g, 10 g y 20 g para inducir un efecto detectable, con diferentes frecuencias de rotación como antes, lo que dio lugar a un total de 558 escenarios de bajo voladizo y 513 escenarios de sobre voladizo.

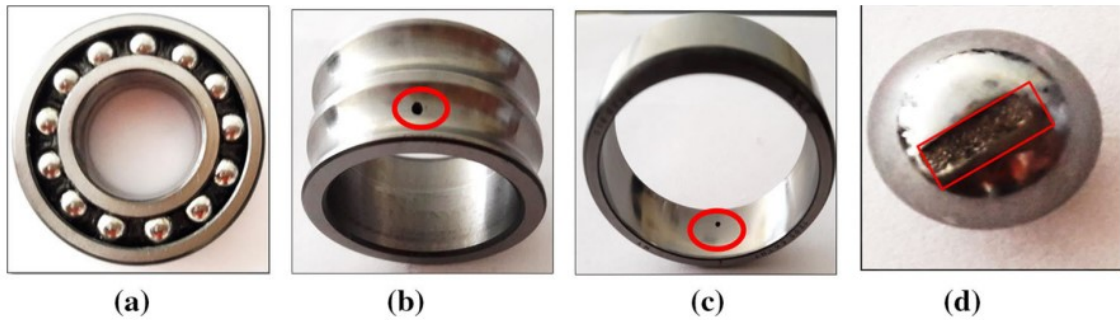


Figura 3: Ejemplos de rodamientos a) Estado normal b) Defecto en pista interior c) Defecto en pista exterior d) Defecto en bola

Los aspectos relacionados con la visualización de las soluciones son cruciales a varios niveles:

- Desde el punto de vista del diseñador, diferentes soluciones exploran el espacio objetivo 4D. Esa exploración evoluciona por sí misma con las generaciones del algoritmo evolutivo multiobjetivo, proporcionando información sobre las soluciones actuales, pasadas y quizás futuras, siendo la dimensionalidad un reto desde la perspectiva de la visualización. También es de especial interés comprobar las capacidades y limitaciones de las aproximaciones con respecto a la exploración del espacio objetivo.
- Desde el punto de vista del probador, es de interés visualizar el comportamiento del consumo de energía durante el proceso de aprendizaje por RL, así como los patrones de vibración ya que podrían ser informativos sobre la validez del motor

La figura 4 ilustra todo el proceso que hay que llevar a cabo para producir los motores válidos seleccionados.

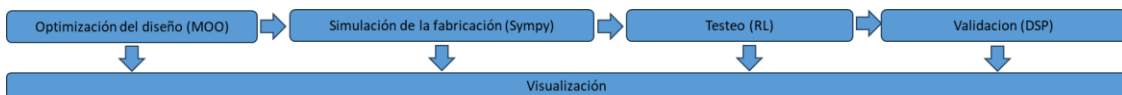


Figure 4: Todo el proceso que debe seguirse para seleccionar motores prototipados válidos antes de su fabricación.