Power Quality

Figura 1: Foto del superordenador JUPITER (centro de datos) © Forschungszentrum Jülich / Sascha Kreklau

Monitorización continua de la red eléctrica en el centro de datos del Forschungszentrum Jülich con JUPITER - el superordenador más rápido de Europa

El Forschungszentrum Jülich opera una de las infraestructuras de investigación más grandes de Europa. Con JUWELS* y JUPITER, el primer superordenador exascala de Europa y actualmente el más rápido del continente**, aumentan significativamente los requisitos en cuanto a estabilidad de la red, disponibilidad y calidad de tensión conforme a las normas. El módulo JUPITER-Booster alcanza 793,40 PFLOPS y funciona con energía renovable. Esta densidad de potencia genera variaciones de carga altamente dinámicas que pueden influir directamente en la calidad de la tensión. La red del campus, en media y baja tensión, integra de forma paralela instalaciones de investigación, laboratorios, plantas de cogeneración, sistemas fotovoltaicos, almacenamiento por baterías, estaciones de carga V2G y centros de datos.

* (Puesto 7 del TOP500, 2020)
** (Europa: Puesto 1 del TOP500, Mundial: Puesto 4, 2025)

1. Situación inicial

Antes de JUPITER, ya se habían instalado más de 120 dispositivos de medición en todo el campus, incluidos en JUWELS. Entre ellos se encontraban los **PQI-DA smart** y **PQI-DE**, con evaluación centralizada y acceso a datos de baja latencia para los servidores de simulación, con el fin de crear un gemelo digital de la red de media tensión del campus.

Situación inicial – Resumen

- Operación exascala con requisitos muy altos de calidad de tensión y disponibilidad
- Red del campus con perfiles mixtos de carga e inyección
- Más de 120 puntos de medición como base, ampliable para JUPITER (17 puntos adicionales)
- Acceso a datos de baja latencia para investigación y validación de modelos

2. Retos típicos para los centros de datos

Los centros de datos son sensibles a las caídas de tensión, el parpadeo, los eventos transitorios, las armónicas y las supraharmónicas. Las tareas intensivas en GPU y la refrigeración generan rápidos cambios de carga. La integración de plantas de cogeneración, sistemas fotovoltaicos, almacenamiento y estaciones V2G modifica los flujos de carga y los espectros de frecuencia hasta 20 kHz. Además del control técnico, se requiere un registro y una documentación conformes con las normas IEC 61000-4-30 Clase A y EN 50160. Al mismo tiempo, el sistema de monitorización debe ser económicamente escalable.

En particular, en infraestructuras HPC como JUPITER, se producen variaciones de corriente de alta frecuencia debido a los saltos de reloj y de carga de los clústeres de GPU. Esto da lugar a picos armónicos de corta duración y a efectos de acoplamiento selectivo en frecuencia entre los niveles de media y baja tensión. Una monitorización continua y de alta resolución de la calidad de la energía permite identificar estos fenómenos transitorios antes de que afecten a los sistemas de alimentación eléctrica sensibles o a los sistemas UPS (SAI).

Retos – Resumen

- Alta dinámica de carga debido a tareas HPC y refrigeración
- Fenómenos PQ hasta 20 kHz causados por electrónica de potencia
- Obligación de registro y documentación conformes con las normas
- Monitorización escalable con costes operativos razonables

3. Objetivo del proyecto

Los aspectos centrales incluyen una transparencia completa de los flujos de carga, la validación de los modelos de simulación y de red, un sistema de alerta temprana eficaz para eventos críticos y flexibilidad para futuras ampliaciones.

Objetivos del proyecto – Resumen

- Transparencia, validación, alerta temprana, flexibilidad, cumplimiento normativo
- Valores medios de 10 minutos más registros de perturbaciones basados en eventos
- Base de tiempo precisa y evaluación centralizada basada en roles

Los datos de medición recopilados no solo se utilizan para la monitorización operativa, sino que también se integran directamente en la validación de los gemelos digitales de la red del campus. De este modo, el centro de investigación puede simular de forma realista los tiempos de respuesta, la estabilidad de tensión y las interacciones de la red, y comparar los resultados con los datos en vivo procedentes de los sistemas PQI.

4. Solución técnica de A. Eberle

El FZJ aplica una arquitectura escalonada compuesta por **PQI-DE**, **PQI-DA smart** y **WebPQ®**. Los **PQI-DE** se instalan en puntos clave, y su gran pantalla permite el acceso directo y en tiempo real a los datos de medición. En los niveles inferiores de la red se emplean **PQI-DA smart** montados en carril DIN, compactos, rentables y optimizados para una monitorización a gran escala. **WebPQ®** agrupa todos los puntos de medición, informes y alarmas en una interfaz central basada en navegador.

El sistema de medición implementado está sincronizado mediante servidores de tiempo basados en GPS o NTP, lo que permite correlacionar con precisión los eventos a través de varios niveles de tensión. Esta sincronización es esencial para identificar claramente las relaciones causa-efecto, por ejemplo, entre las redes de media y baja tensión.

4.1 PQI-DE en nodos críticos

*Figura 2: **PQI-DE** – Monitorización en nodos críticos del centro de datos*

PQI-DE – Resumen

- Medición de clase A para nodos de red críticos
- Gran pantalla para acceso directo a los datos de medición
- Registros de perturbaciones activados por eventos y altas tasas de muestreo
- Sincronización y amplia memoria local

4.2 PQI-DA smart en el área

Figura 3: **PQI-DA smart** *– para escalar los puntos de medición en niveles inferiores de la red*

PQI-DA smart – Resumen

- Diseño compacto para montaje en carril DIN
- Enfocado en mediciones secundarias escalables
- Medición de clase A para tensión, corriente y armónicas
- Implementación económica en toda la red

4.3 Concepto de medición y ruta de datos

En todo el campus hay más de 140 puntos de medición activos, de los cuales unos 15 **PQI-DE** en el entorno de JUPITER, complementados con numerosos **PQI-DA smart** en nodos secundarios.

4.4 Plataforma de software WebPQ®

WebPQ® – Resumen

- Análisis centralizado en navegador con roles y permisos
- Datos en vivo, alarmas, informes normativos, exportaciones
- Modbus TCP/IP y OPC UA para integración de sistemas

Figura 4: **WebPQ®** *– Análisis PQ central para todos los puntos de medición en la red JUPITER*

4.5 Seguridad informática en WebPQ®

Especialmente en el contexto de los centros de datos de alto rendimiento, la seguridad informática de la plataforma de monitorización es de suma importancia. **WebPQ®** cumple con los requisitos actuales de seguridad de datos y ciberresiliencia:

- Comunicación cifrada mediante HTTPS y TLS
- Gestión de usuarios y permisos basada en roles
- Mecanismos de autenticación seguros (incluidas opciones 2FA)
- Registros de auditoría y trazabilidad a prueba de manipulaciones
- Segmentación opcional en redes protegidas

Esto garantiza que los datos PQ críticos se registren y procesen de manera segura, algo esencial para los operadores de centros de datos e infraestructuras de investigación. Además, **WebPQ®** admite la integración con sistemas de gestión de información y eventos de seguridad (SIEM), lo que permite incorporar los eventos y alertas de seguridad en el concepto global de seguridad del centro de investigación - un punto clave para la protección de infraestructuras críticas de investigación y energía.

5. Resultados de medición y conclusiones

5.1 Flujos de carga y análisis de tendencias

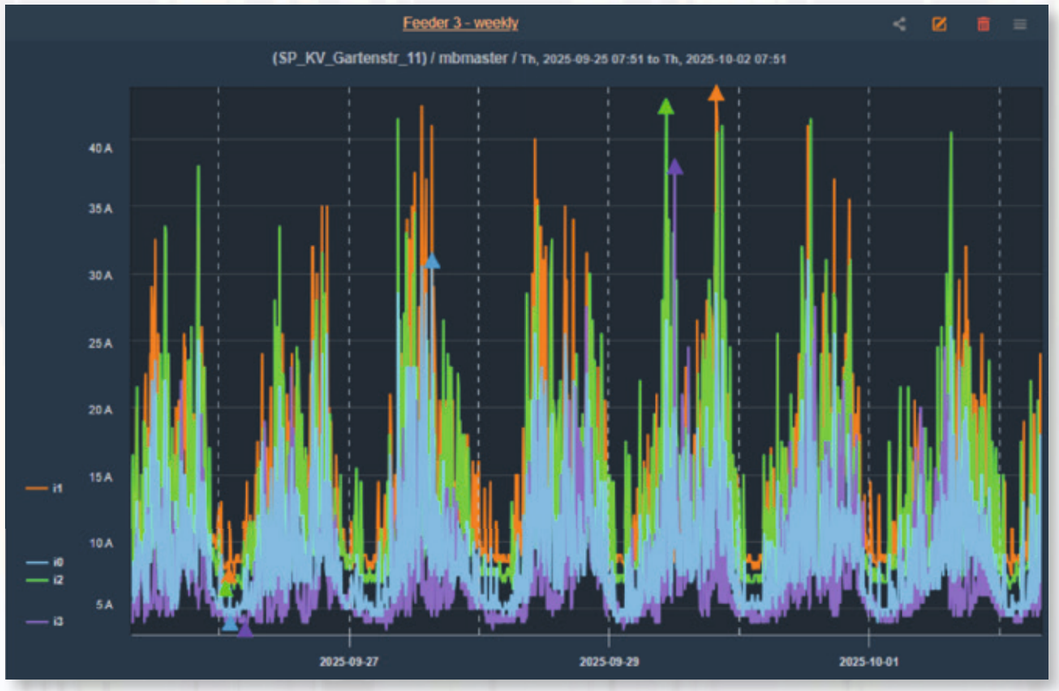

Figura 5a: Curvas de corriente (I1, I2, I3) con resolución semanal para un alimentador seleccionado. La ilustración muestra perfiles típicos de carga diaria y picos de carga característicos, como los observados en la operación HPC del Forschungszentrum Jülich.

Figura 5b: Curvas de potencia (P, Q, S) con resolución mensual. Se observan patrones recurrentes de carga base y de carga máxima, así como diferencias en el comportamiento de la potencia reactiva, comparables con los perfiles dinámicos del centro de datos JUPITER.

Figura 5c: Curvas de tensión (U1, U2, U3) con resolución mensual. La figura documenta fluctuaciones y caídas de tensión típicas en entornos HPC con gran dinámica de carga.

La evaluación de las curvas de corriente y tensión permite una valoración precisa de la simetría de la red y de la carga por fase. El análisis de tendencias a largo plazo permite detectar precozmente cambios graduales en el comportamiento de carga, por ejemplo, debidos a actualizaciones de software, ampliaciones de servidores o modificaciones en las estrategias de refrigeración.

5.2 Transitorios y tiempos de respuesta

Figura 6a: Registro transitorio durante el arranque paralelo de varios trabajos HPC. Se observa una caída de tensión de corta duración y una desviación de frecuencia causadas por la elevada corriente de arranque.

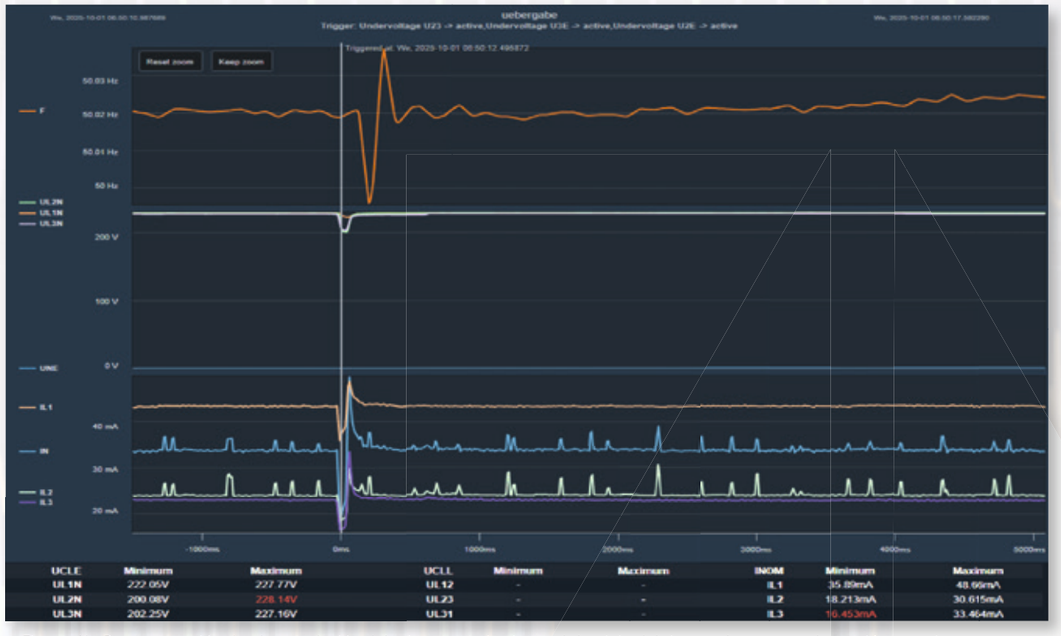

Figura 6b: Representación de alta resolución del mismo transitorio en el dominio del tiempo. Las curvas de tensión y corriente muestran las corrientes de arranque dinámicas de las fuentes de alimentación de los servidores y evidencian la carga de la red durante la fase de arranque.

La combinación de registro activado por eventos y alta tasa de muestreo (hasta 200 kHz por canal) permite capturar con precisión caídas de tensión en el rango de los milisegundos y cuantificar su impacto en los sistemas UPS (SAI) o en las cargas sensibles.

5.3 Armónicas y supraharmónicas

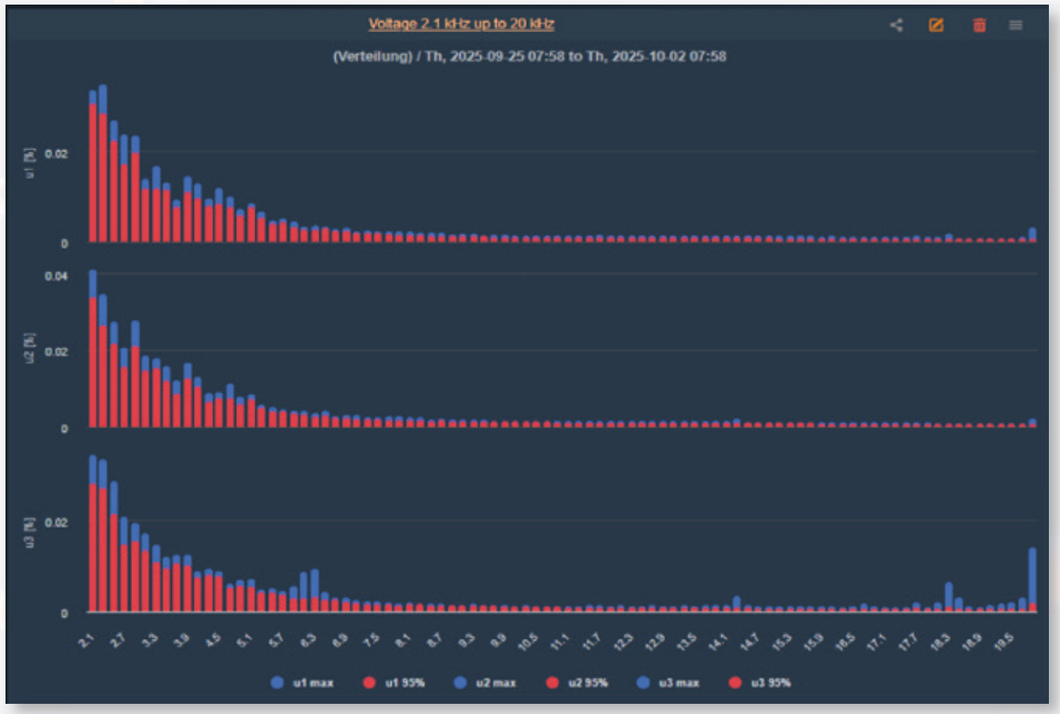

Figura 7: Análisis de armónicas y supraharmónicas hasta 20 kHz. Las distribuciones muestran picos espectrales típicos generados por las fuentes de alimentación conmutadas de los servidores. Se identificaron efectos selectivos en frecuencia y posibles zonas de resonancia, que se incorporan a la planificación de conceptos de filtrado e inductancias.

El análisis de las supraharmónicas hasta 20 kHz permitió identificar agrupaciones espectrales que corresponden a las frecuencias de conmutación de determinadas fuentes de alimentación. Estos resultados sirven de base para el dimensionamiento selectivo de filtros y la optimización EMC del sistema de alimentación eléctrica.

6. Beneficios para el operador

El concepto combinado **PQI-DE**, **PQI-DA smart** y **WebPQ®** proporciona una transparencia total, desde la línea de alimentación hasta la distribución secundaria, garantiza la conformidad normativa y ofrece una base sólida para la toma de decisiones.

Además, el sistema proporciona indicadores clave valiosos para la gestión energética y la planificación de capacidad. El análisis continuo de la potencia reactiva y las asimetrías de tensión permite reducir los costes operativos y optimizar el funcionamiento de los componentes de la red en función de la carga.

7. Conclusión y perspectivas

El proyecto demuestra cómo se pueden gestionar conjuntamente los requisitos exascala y la transición energética: mediante medición Clase A, una arquitectura escalonada y una evaluación centralizada. Este enfoque es transferible a otros centros de datos y redes de campus. Los próximos pasos incluyen una mayor automatización, análisis predictivo y una integración más estrecha entre monitorización, simulación y control.

A largo plazo, los modelos de aprendizaje automático dentro de **WebPQ®** podrán reconocer automáticamente patrones recurrentes y generar alertas tempranas, avanzando hacia una monitorización energética autónoma en centros de datos de alto rendimiento.

8. Normas, métodos de medición e integración en entornos de simulación

Las mediciones se realizaron conforme a la norma IEC 61000-4-30 Ed. 4 Clase A. Las armónicas se midieron según IEC 61000-4-7, el parpadeo según IEC 61000-4-15, y las supraharmónicas en el rango de 2 a 20 kHz. La documentación se elaboró conforme a EN 50160. Se utilizaron valores medios de 10 minutos para los informes de tendencia y registros basados en eventos para los fenómenos transitorios. Una base de tiempo precisa y la sincronización garantizan coherencia entre los puntos de medición distribuidos. **WebPQ®** actúa como fuente central de datos para la sala de control y la investigación, con integración a través de Modbus TCP/IP.

Mediante interfaces estandarizadas (CSV, OPC UA, REST API), los datos de medición se importan directamente en entornos de simulación e investigación como MATLAB®/Simulink® o DIgSILENT PowerFactory®. Esto permite correlacionar el comportamiento real y el simulado de la red, así como calibrar los modelos de flujo de carga y estabilidad.

9. Novedad de producto: PQI-LV

Recientemente se ha lanzado el PQI-LV.

Este dispositivo de medición está diseñado para ser especialmente rentable en aplicaciones de baja tensión que requieren un gran número de puntos de medición con alta precisión y a un precio competitivo. Complementa perfectamente la gama existente y abre nuevas posibilidades para los operadores que deseen monitorizar la calidad de la energía de manera integral y económica.

En contextos similares, como la aplicación en centros de datos como el del FZ Jülich, el **PQI-LV** resulta especialmente adecuado para la monitorización completa del nivel de baja tensión en salas de servidores y laboratorios, donde el espacio y el presupuesto son limitados, pero una monitorización precisa de la tensión sigue siendo esencial.

*Figura 8: **PQI-LV** – nueva solución rentable para redes de baja tensión*

Autores

Fabian Leppich

Product Manager »PQSys«
A. Eberle GmbH & Co. KG

Maximilian Sefz

Director de Marketing
A. Eberle GmbH & Co. KG

Wolfgang Reitmeier

Ventas
A. Eberle GmbH & Co. KG

Figura 9: Foto del superordenador JUPITER (centro de datos) © Forschungszentrum Jülich / Sascha Kreklau

JÜLICH
Forschungszentrum

¿Tiene preguntas o desea asesoramiento sobre nuestras soluciones para el monitoreo continuo de redes en centros de datos, empresas de energía o redes industriales de campus?

Solo tiene que escanear el código QR o escribirnos a sales@a-eberle.de

¡Esperamos su mensaje!

A. Eberle GmbH & Co. KG
Frankenstraße 160
D-90461 Nürnberg
Tel +49(0)911 628108-0
Fax +49(0)911 628108-99
sales@a-eberle.de
www.a-eberle.com

11/25