

MANUAL DE USO

ANALIZADOR DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA

PQM-700



MANUAL DE USO

ANALIZADOR DE LA CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA PQM-700



**SONEL S.A.
Wokulskiego 11
58-100 Świdnica
Polonia**

Versión 1.15.8 30.06.2023



Debido al constante desarrollo de los productos, el fabricante se reserva el derecho de hacer cambios en las funcionalidades, el uso y los datos técnicos. Este manual de uso describe los analizadores en la versión del firmware 1.15 y el software Sonel Analysis en la versión 4.4.8.

ÍNDICE

1 Información general.....	6
1.1 Seguridad.....	6
1.2 Característica general.....	7
1.3 Alimentación del analizador.....	9
1.4 Estanqueidad y funcionamiento en condiciones exteriores.....	9
1.5 Montaje en el carril DIN.....	10
1.6 Parámetros medidos.....	11
1.7 Conformidad con las normas.....	13
2 Funcionamiento del analizador.....	14
2.1 Botones.....	14
2.2 Luces indicadoras.....	14
2.3 Encendido y apagado.....	15
2.4 Función del apagado automático.....	15
2.5 Conexión con PC y transmisión de datos.....	15
2.6 Indicación de una conexión errónea.....	16
2.7 Advertencia de una tensión o corriente demasiado alta.....	17
2.8 Realización de mediciones.....	17
2.8.1 Inicio y detención del registro.....	17
2.8.2 Tiempos de registro aproximados.....	17
2.9 Sistemas de medición.....	18
2.10 Corriente de arranque.....	23
2.11 Bloqueo de botones.....	23
2.12 Modo de espera.....	23
2.13 Actualización de firmware.....	24
2.13.1 Actualización automática.....	24
2.13.2 Actualización manual.....	24
3 Programa "Sonel Analysis".....	25
4 Estructura y métodos de medición.....	26
4.1 Entradas de tensión.....	26
4.2 Entradas de corriente.....	26
4.2.1 Integrador digital.....	26
4.3 Muestreo de la señal.....	27
4.4 Sincronización PLL.....	28
4.5 Medición de frecuencia.....	28
4.6 Método de medición de los componentes armónicos.....	29
4.7 Detección de eventos.....	30
5 Fórmulas de cálculo.....	32
5.1 Red monofásica.....	32
5.2 Red bifásica.....	35
5.3 Red trifásica tipo estrella con N.....	37
5.4 Red trifásica tipo estrella y triángulo sin N.....	40
5.5 Métodos para promediar los parámetros.....	42

6	Calidad de alimentación - manual	43
6.1	Información básica	43
6.2	Medición de corriente	44
6.2.1	Pinzas rígidas (CT) para medir las corrientes alternas (AC)	44
6.2.2	Pinzas para medir las corrientes alternas y continuas (AC/DC)	44
6.2.3	Pinzas flexibles	45
6.3	Parpadeo de luz (Flicker)	46
6.4	Medición de potencia	46
6.4.1	Potencia activa	47
6.4.2	Potencia reactiva	47
6.4.3	Potencia reactiva y los sistemas de 3 conductores	50
6.4.4	Potencia reactiva y contadores de energía reactiva	51
6.4.5	Contadores de energía reactiva de 4 cuadrantes	52
6.4.6	Potencia aparente	53
6.4.7	Potencias de distorsión D_B y la potencia eficaz aparente de la distorsión S_{eN}	55
6.4.8	Factor de potencia	55
6.5	Armónicos	56
6.5.1	Característica de los armónicos en sistemas trifásicos	57
6.5.2	Factor THD	58
6.5.3	Distorsión en demanda TDD	59
6.6	Desequilibrio	60
6.7	Huecos, subidas e interrupciones de tensión u	61
6.8	Curvas CBEMA y ANSI	63
6.9	Cálculo de la media de los resultados de las mediciones	64
7	Datos técnicos	66
7.1	Entradas	66
7.2	Muestreo y reloj RTC	67
7.3	Parámetros medidos: precisión, resolución y rango	67
7.3.1	Condiciones de referencia	67
7.3.2	Tensión	68
7.3.3	Corriente	68
7.3.4	Frecuencia	69
7.3.5	Armónicos	69
7.3.6	Potencia y energía	69
7.3.7	Estimación de incertidumbre de medición de potencia y energía	70
7.3.8	Parpadeo de luz	71
7.3.9	Desequilibrio	72
7.4	Detección de eventos: valores eficaces de tensión y corriente	72
7.5	Detección de eventos: otros parámetros	72
7.5.1	Histéresis de detección de eventos	73
7.6	Medición de corriente de arranque	73
7.7	Registro	73
7.8	Alimentación de la red, batería y calentador	74
7.9	Redes compatibles	75
7.10	Pinzas de corriente compatibles	75
7.11	Comunicación	75
7.12	Condiciones ambientales y otros datos técnicos	76
7.13	Seguridad y compatibilidad electromagnética	76
7.14	Estándares	76
8	Accesorios adicionales	77
9	Más información	78

9.1 Limpieza y mantenimiento.....	78
9.2 Almacenamiento	78
9.3 Desmontaje y utilización	78
9.4 Fabricante	78

1 Información general

Los siguientes símbolos internacionales se utilizan en el analizador y en este manual:

	Advertencia; Véase la explicación en el manual		Toma de tierra		Corriente/Tensión alterna
	Corriente/Tensión continua		Doble aislamiento (clase de protección)		Declaración de conformidad con las directivas de la Unión Europea (Conformité Européenne)
	No eliminar junto con otros residuos urbanos		Información relativa al reciclaje		Conformidad con las normas australianas

1.1 Seguridad



¡Advertencia!

Para asegurar el servicio seguro y la exactitud de los resultados obtenidos se debe evitar la descarga eléctrica o incendio, así como seguir estas recomendaciones:

- Antes de empezar la utilización del analizador es necesario familiarizarse detalladamente con el presente manual y cumplir con las normas de seguridad y las recomendaciones del fabricante.
- Un uso del analizador distinto del especificado en este manual puede dañar el dispositivo y ser fuente de grave peligro para el usuario.
- Analizadores pueden ser utilizados solamente por el personal cualificado que esté facultado para realizar trabajos con las instalaciones eléctricas. El uso del dispositivo por personas no autorizadas puede causar su deterioro y ser fuente de grave peligro para el usuario.
- Se prohíbe utilizar el dispositivo en redes y equipos donde haya condiciones especiales, por ejemplo, donde exista el riesgo de explosión e incendio.
- Antes de iniciar el trabajo, se debe comprobar si el analizador, conductores, sondas de corriente y otros accesorios están libres de daños mecánicos. Prestar especial atención a las conexiones.
- Se prohíbe utilizar:
 - ⇒ el dispositivo deteriorado y que no funciona total o parcialmente,
 - ⇒ los cables con el aislamiento dañado,
 - ⇒ aparato y accesorios dañadas mecánicamente.
- Se prohíbe alimentar el dispositivo con otras fuentes de energía que las mencionadas en este manual.
- No conectar las entradas del analizador a voltajes más altos que los valores nominales.
- Utilizar accesorios y sondas de medición con los parámetros nominales adecuados y la categoría de medición apropiada para el circuito examinado.
- No exceder los parámetros nominales de la categoría de medición más baja (CAT) del equipo de medición utilizado que se compone del analizador, sondas y accesorios. La categoría de medición de todo el equipo es la mismo que el componente con la categoría de medición más baja.
- Si es posible, se debe conectar el analizador a los circuitos con la alimentación apagada.

- La apertura de las tapas de enchufes del dispositivo causa la pérdida de estanqueidad, lo que en caso de condiciones meteorológicas desfavorables puede causar el deterioro del instrumento, así como exposición o poner al usuario en peligro de choque eléctrico.
- No trasladar el analizador sujetándolo por los cables.
- No desenroscar las tuercas de los prensaestopas con cables porque están pegadas. El desenroscamiento hace que se pierda la garantía.
- Las reparaciones pueden ser realizadas sólo por el servicio autorizado.

El analizador está equipado con una batería interna de Li-Ion que ha sido probada por un laboratorio independiente y tiene el certificado de ensayos de compatibilidad de parámetros con la norma 38.3 - "Recomendaciones de la ONU para el transporte de mercancías peligrosas. Manual de Pruebas y Criterios", quinta edición publicada por las Naciones Unidas (ST/SG/AC.10/11/Rev.5). Por lo tanto, el analizador está aprobado para el transporte aéreo, marítimo y por carretera.

1.2 Característica general

El analizador de calidad eléctrica PQM-700 (Fig. 1) es un producto de alta tecnología que permite la medición universal, el análisis y el registro de los parámetros de las redes eléctricas de 50/60 Hz y la calidad de la energía eléctrica de acuerdo con la normativa europea EN 50160. El analizador cumple plenamente con los requisitos de la norma IEC 61000-4-30 clase S.

El analizador está equipado con 4 cables con enchufe tipo banana marcados como L1, L2, L3, N. El rango de tensiones medidas por los cuatro canales de medición es como máximo de ± 1150 V. Este rango se puede aumentar utilizando los transformadores adicionales externos de tensión.

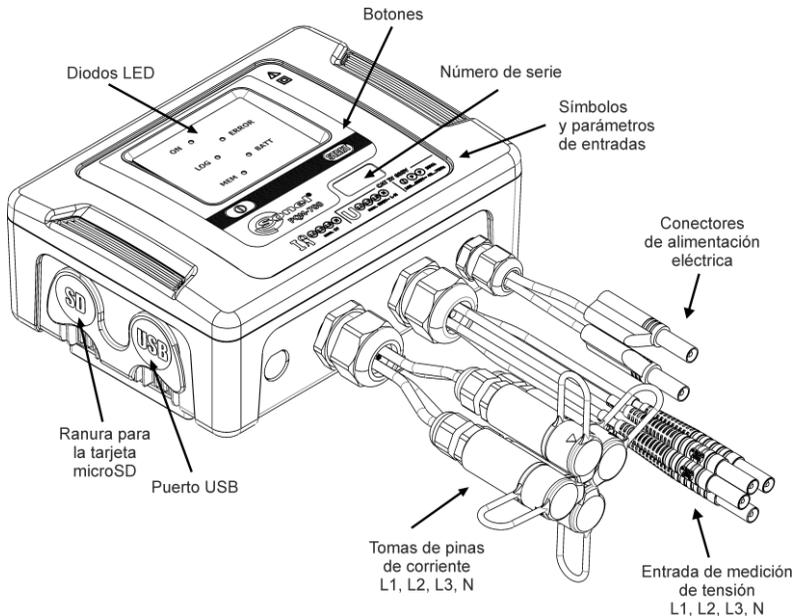


Fig. 1. Analizador de calidad de energía eléctrica PQM-700. Vista general.

La corriente se mide mediante cuatro entradas de corriente introducidas en los cables cortos terminados con enchufes para pinzas. A ellos se pueden conectar las pinzas flexibles F-1(A), F-

1 Información general

2(A)(HD), F-3(A)(HD) con el rango nominal de 3000 A (que sólo se diferencian por el diámetro de la bobina) y las pinzas rígidas C-4 (rango de 1000 A AC), C-5A (rango de 1000 A AC/DC), C-6(A) (rango de 10 A AC) y C-7(A) (rango de 100 A AC). Además, en caso de las corrientes, el rango nominal se puede cambiar mediante los transformadores adicionales, por ejemplo usando el transformador 1000:5 con la pinza C-6(A) se puede medir la corriente hasta 1000 A.

El dispositivo tiene una tarjeta de memoria extraíble estándar de 2 GB. Los datos de la tarjeta se pueden leer utilizando la conexión USB o el lector externo.

Nota
La tarjeta SD sólo debe ser extraída cuando el analizador está apagado. La extracción de la tarjeta durante el uso del analizador puede causar la pérdida de datos importantes.

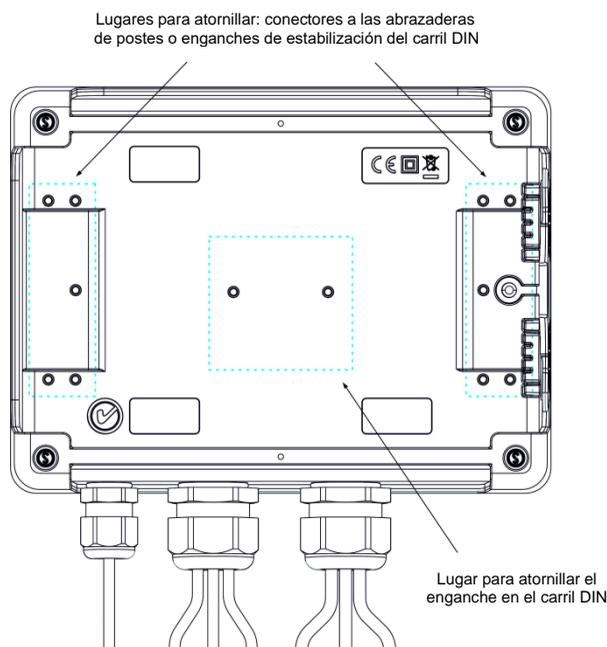


Fig. 2. La parte trasera del analizador PQM-700.

Los parámetros registrados se dividen en grupos que se pueden incluir o excluir del registro de forma independiente, lo que permite el uso racional de espacio en la tarjeta de memoria. Los parámetros no registrados no ocupan espacio por lo que se prolonga bastante el tiempo de registro de otros parámetros.

El analizador PQM-700 dispone de una fuente de alimentación interna con un amplio rango de tensiones de entrada 100...415 V AC (140...415 V DC) con los conectores tipo banana independientes.

Una característica importante es su posibilidad de trabajo en condiciones atmosféricas desfavorables, el analizador se puede instalar directamente en los postes eléctricos. Asegura la estanqueidad de clase IP65 y el rango de temperatura de trabajo es -20 °C...+55 °C.

La batería interna de iones de litio asegura el funcionamiento ininterrumpido en caso de pérdida de tensión de alimentación.

La interfaz de usuario ofrecen 5 diodos LED y 2 botones.

El elemento que muestra todas las posibilidades del dispositivo es el software de PC "Sonel Analysis".

La comunicación con el ordenador es posible con una conexión USB que asegura la velocidad de transmisión de hasta 921,6 kbit/s.

1.3 Alimentación del analizador

El analizador tiene una fuente de alimentación incorporada con el rango de tensiones nominales de 100...415 V AC o 140...415 V DC. La fuente de alimentación tiene los cables independientes (en color rojo) marcados con la letra P (de la palabra inglesa *power* - energía). Para evitar que el alimentador se dañe si se intenta alimentarlo con una tensión por debajo del rango especificado, se desactiva con las tensiones de entrada por debajo de unos 80 V AC (aprox. 110 V DC).

Para mantener la alimentación durante los cortes de energía sirve la batería interna. La batería se carga cuando existe tensión en los terminales del alimentador de la red. La batería mantiene la alimentación hasta 6 h a la temperatura entre -20°C...+55°C. Cuando la batería se agota, el medidor detiene el trabajo en curso (p.ej. registro) y se apaga de emergencia. Cuando vuelve la alimentación, el analizador sigue con el trabajo que ha sido interrumpida.

Nota

La batería puede cambiarse solamente en el servicio autorizado.

1.4 Estanqueidad y funcionamiento en condiciones exteriores

El analizador PQM-700 está diseñado para trabajar en condiciones atmosféricas desfavorables, puede ser instalado directamente en los postes eléctricos. Para su instalación hay dos abrazaderas con hebillas y dos conectores de plástico. Los conectores se atornillan a la parte trasera de la carcasa y por los huecos se deben pasar las abrazaderas.

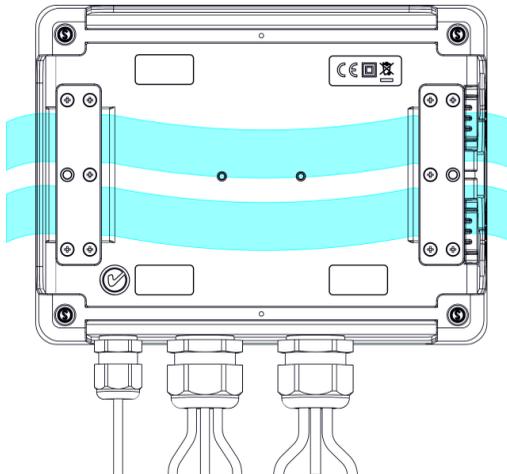


Fig. 3. Conectores y abrazaderas para el montaje del analizador en el poste.

El analizador asegura la estanqueidad de clase IP65 y el rango de temperatura de trabajo es de -20°C...+55°C.



Nota

Para asegurar la clase de estanqueidad IP65 declarada es necesario cumplir con las siguientes normas:

- Estancar los tapones del puerto USB y de la tarjeta microSD,
- Estancar los enchufes hembras de pinzas no utilizados con tapones de silicona.

A la temperatura ambiente inferior a 0°C y si la temperatura interna también está por debajo de este umbral, se enciende el calentamiento del dispositivo con un calentador interno cuyo objetivo es mantener dentro la temperatura positiva en el rango de temperatura ambiente de -20°C...0°C. El calentador se alimenta de la fuente de red incorporada y su potencia se limita a unos 5 W.

Debido a la batería de iones de litio incorporada, su carga se bloquea cuando la temperatura de la batería está fuera del rango de -10°C...60°C (el estado de carga en el programa Sonel Analysis se muestra como "carga suspendida").

1.5 Montaje en el carril DIN

En el conjunto está suministrado un enganche para montar el analizador en el carril DIN estándar. El enganche se atornilla a la parte trasera del analizador utilizando los tornillos suministrados. En el conjunto también se suministran los enganches de posicionamiento (excepto los enganches para montar el analizador en el poste) que deben ser instalados con el fin de aumentar la estabilidad de la fijación. Los enganches tienen unos ganchos especiales que se sujetan en el carril DIN.

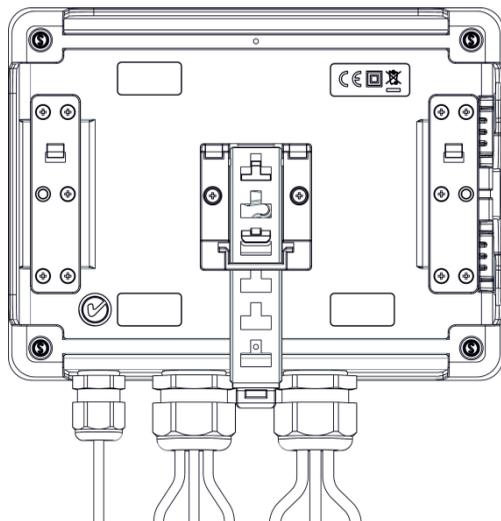


Fig. 4. La parte trasera del analizador con los elementos de montaje en el carril DIN.

1.6 Parámetros medidos

El analizador PQM-700 permite medir y registrar los siguientes parámetros:

- tensiones eficaces de fase y entre fases en el rango hasta 760 V (pico ± 1150 V),
- corrientes eficaces:
 - hasta 3000 A (pico ± 10 kA) utilizando las pinzas flexibles (F-1(A), F-2(A)(HD), F-3(A)(HD)),
 - hasta 1000 A (pico ± 3600 A) utilizando las pinza rígida C-4(A) o C-5A,
 - hasta 10 A (pico ± 36 A) con la pinza C-6(A),
 - hasta 100 A (pico ± 360 A) con la pinza C-7(A),
- factores de cresta de corriente y tensión,
- frecuencia de red en el rango de 40...70 Hz,
- potencias y energías activas, reactivas, aparentes, potencia de distorsión,
- componentes armónicas de tensiones y corrientes (hasta 40^a),
- factor de distorsión armónica THD_F y THD_R para corriente y tensión,
- factor de potencia, $\cos\phi$, $\tan\phi$,
- factores de desequilibrio de redes trifásicas y componentes simétricas,
- indicadores de parpadeo de luz P_{st} y P_{It},
- corriente de arranque hasta 60 s.

Los parámetros escogidos se agregan (promedian) según el tiempo elegido por el usuario y pueden ser guardados en la tarjeta de memoria. Además del valor medio se puede registrar el valor mínimo y máximo durante el intervalo de promediación y el valor instantáneo durante el registro de datos.

El bloque de detección de eventos también está desarrollado. Los eventos típicos en la norma EN 50160 son: hueco (es decir, disminución del valor eficaz de tensión por debajo del 90% del valor nominal de tensión), crecimiento (aumento por encima del 110% del valor nominal) e interrupción (bajada de tensión por debajo del umbral del 5% del valor nominal). El usuario no necesita introducir por sí mismo los ajustes definidos en la norma EN 50160, el programa permite la configuración automática del instrumento en modo de medición de calidad de energía de acuerdo con la norma EN 50160. El usuario puede utilizar la configuración propia, el programa ofrece toda la flexibilidad en este campo. La tensión es sólo uno de muchos parámetros, para los cuales se pueden definir los umbrales de detección de eventos. Por ejemplo, es posible configurar el analizador para que detecte la bajada del factor de potencia por debajo del umbral definido, también puede detectar cuando THD excede otro umbral, así como el noveno armónico de tensión excede la tensión del valor porcentual fijado por el usuario. El evento se guarda junto con el tiempo en el que apareció. En caso de eventos que exceden los umbrales de hueco, interrupción o crecimiento, y en caso de superar el valor mínimo y máximo para corrientes, se puede completar la información sobre la aparición del evento con una forma de onda de tensiones y corrientes. Se pueden guardar 2 períodos antes y 4 después del evento.

Las amplias posibilidades de configuración y la multitud de parámetros medidos hacen que el analizador PQM-700 sea un dispositivo extraordinariamente útil y poderoso para medir y analizar todo tipo de redes de alimentación y alteraciones que aparecen en ellas. Algunas de las características únicas de este dispositivo lo distinguen entre otros analizadores de este tipo disponibles en el mercado.

En la se presenta una especificación sumaria de los parámetros medidos por el analizador PQM-700 dependiendo del tipo de red.

Tabla 1. Los parámetros medidos para varias configuraciones de la red.

Tipo de red, canal		1-f		2-f				3-f estrella con N					3-f triángulo 3-f estrella sin N			
		L1	N	L1	L2	N	Σ	L1	L2	L3	N	Σ	L12	L23	L31	Σ
U	Tensión eficaz	•		•	•			•	•	•			•	•	•	
U _{bc}	Componente constante de tensión	•		•	•			•	•	•			•	•	•	
I	Corriente eficaz	•	•	•	•	•		•	•	•	•		•	•	•	
I _{bc}	Componente constante de corriente	•	•	•	•	•		•	•	•	•		•	•	•	
f	Frecuencia	•		•				•					•			
CF U	Factor de pico de tensión	•		•	•			•	•	•			•	•	•	
CF I	Factor de pico de corriente	•	•	•	•	•		•	•	•	•		•	•	•	
P	Potencia activa	•		•	•		•	•	•	•		•				•
Q ₁ , Q _B	Potencia reactiva	•		•	•		•	•	•	•		•				• ⁽¹⁾
D, S _N	Potencia de distorsión	•		•	•		•	•	•	•		•				
S	Potencia aparente	•		•	•		•	•	•	•		•				•
PF	Factor de potencia	•		•	•		•	•	•	•		•				•
cosφ	Factor de desplazamiento de fase	•		•	•		•	•	•	•		•				
tanφ _{C-} , tanφ _{L+} , tanφ _{L-} , tanφ _{C+}	Factor de tangente φ (4 cuadrantes)	•		•	•		•	•	•	•		•				• ⁽¹⁾
THD U	Factor de contenidos armónicas de tensión	•		•	•			•	•	•			•	•	•	
THD I	Factor de contenidos armónicas de corriente	•	•	•	•	•		•	•	•	•		•	•	•	
E _{P+} , E _{P-}	Energía activa (consumida y devuelta)	•		•	•		•	•	•	•		•				•
E _{OC-} , E _{OL+} , E _{QL-} , E _{QC+}	Energía reactiva (de cuatro cuadrantes)	•		•	•		•	•	•	•		•				• ⁽¹⁾
E _S	Energía aparente	•		•	•		•	•	•	•		•				•
U _{h1..h40}	Amplitudes de armónicos de tensión	•		•	•			•	•	•			•	•	•	
I _{h1..h40}	Amplitudes de armónicos de corriente	•	•	•	•	•		•	•	•	•		•	•	•	
Asimetría U, I	Componentes simétricas y factores de asimetría											•				•
P _{st} , P _{lt}	Indicadores de parpadeo de luz	•		•	•			•	•	•			•	•	•	

Notas: L1, L2, L3 (L12, L23, L31) significan las siguientes fases,

N significa la medición para el canal de corriente I_N dependiendo del tipo de parámetro,

Σ significa el valor total del sistema.

(1) $N = \sqrt{S_2^2 - P^2}$ En las redes de 3 conductores, como la potencia reactiva total se calcula la potencia inactiva (ver el debate sobre la potencia reactiva en el sección 6.4)

1.7 Conformidad con las normas

El analizador PQM-700 está diseñado para cumplir con los requisitos de las siguientes normas. Normas de medición de los parámetros de la red:

- IEC 61000-4-30:2011 - Compatibilidad electromagnética (EMC) - Técnicas de ensayo y de medida - Métodos de medida de la calidad de energía,
- IEC 61000-4-7:2007 – Compatibilidad electromagnética (EMC) - Técnicas de ensayo y de medida - Manual general de mediciones de armónicos e interarmónicos, así como de los instrumentos de medición aplicados para las redes de alimentación y los dispositivos conectados a estas redes,
- IEC 61000-4-15:2011 – Compatibilidad electromagnética (EMC) - Técnicas de ensayo y de medida- Medidor de parpadeo de luz - Especificaciones funcionales y de diseño,
- EN 50160:2010 – Parámetros de la tensión suministrada por las redes generales de distribución.

Normas de seguridad:

- IEC 61010-1 – Requisitos de seguridad de equipos eléctricos de medida, control y uso en laboratorio. Parte 1: Requisitos generales

Normas de compatibilidad electromagnética:

- IEC 61326 – Equipos eléctricos para medida, control y uso en laboratorio. Requisitos de compatibilidad electromagnética (EMC):

El dispositivo cumple en su totalidad con los requisitos de la clase S según la norma IEC 61000-4-30. Los datos se resumen en la tabla presentada a continuación.

Tabla 2. Resumen del cumplimiento con las normas de los parámetros seleccionados

Agregación de mediciones en intervalos de tiempo	IEC 61000-4-30 Clase S: <ul style="list-style-type: none"> • El tiempo básico de medición de parámetros (tensión, corriente, armónicos, asimetría) es el intervalo de 10 ciclos para el sistema de alimentación de 50 Hz y de 12 ciclos para el sistema de 60 Hz, • Intervalo de 3 s (150 ciclos para la frecuencia nominal de 50 Hz y 180 ciclos para 60 Hz), • Intervalo de 10 minutos.
Incertidumbre del tiempo de reloj	IEC 61000-4-30 Clase S: <ul style="list-style-type: none"> • Reloj de tiempo real incorporado y ajustado desde el programa "Sonel Analysis", sin sincronización GPS y por radio, • Exactitud del reloj superior a $\pm 0,3$ s/día
Frecuencia	Cumple con los requisitos de la norma IEC 61000-4-30 Clase S para el método y la incertidumbre de medición
Valor de la tensión de alimentación	Cumple con los requisitos de la norma IEC 61000-4-30 Clase S para el método y la incertidumbre de medición
Fluctuaciones de tensión (parpadeo de luz)	Método de medición e incertidumbre cumplen con los requisitos de la norma IEC 61000-4-15
Huecos, sobretensiones e interrupciones de tensión de alimentación	Cumplen con los requisitos de la norma IEC 61000-4-30 Clase S para el método y la incertidumbre de medición
Desequilibrio de tensión de alimentación	Cumple con los requisitos de la norma IEC 61000-4-30 Clase S para el método y la incertidumbre de medición
Armónicos de tensión y corriente	Método e incertidumbre de medición conforme con IEC 61000-4-7 clase I

2 Funcionamiento del analizador

2.1 Botones

El teclado del analizador se compone de dos botones: ON/OFF  y START/STOP . Para encender el analizador se debe pulsar el botón ON/OFF. El botón START/STOP se utiliza para iniciar y detener el registro.

2.2 Luces indicadoras

El analizador está equipado con cinco diodos LEDs que indican diferentes estados de trabajo:

- **ON** (verde) – el diodo se ilumina cuando el analizador está encendido. Durante el registro con el modo de espera activado, el diodo se apaga.
- **LOG** (amarillo) – indica el registro en curso. En modo de espera el diodo se enciende continuamente. Durante la grabación parpadea. Durante el registro con el modo de espera activado, se apaga y se enciende brevemente cada 10 segundos.
- **ERROR** (rojo) - el diodo que parpadea indica un problema potencial con la conexión a la red examinada o la incompatibilidad de la configuración activa con los parámetros de la red. Los criterios de control se muestran en la sección 2.6. La luz constante indica uno de los posibles errores internos del analizador (véase también la descripción a continuación de los estados adicionales).
- **MEM** (rojo) - la luz indica que o se pueden registrar los datos en la tarjeta de memoria. El diodo **MEM** se ilumina de forma continua después de llenar todo el espacio en la tarjeta de memoria. Véase también la siguiente descripción de estados adicionales.
- **BATT** (rojo) - estado de la batería. El parpadeo indica que la batería está baja (capacidad de 20% o menos). Cuando la batería está completamente descargada, el diodo ilumina durante 5 segundos (le acompaña una señal sonora) y después el analizador se apaga de emergencia.

Estados adicionales indicados por los diodos:

- La iluminación continua de diodos **MEM** y **ERROR** – no hay ninguna tarjeta de memoria, la tarjeta está dañada o no formateada. Si los diodos se encienden al insertar la tarjeta de memoria en la ranura, hay dos escenarios posibles:
 - la tarjeta está dañada o incompatible con el analizador. En este caso no hay ninguna posibilidad de seguir trabajando con el analizador. El botón START  no está activo.
 - la tarjeta está formateada (faltan archivos requeridos por el analizador o archivos están dañados) - en este caso se puede pulsar el botón START  (está activo), lo que iniciará a formatear la tarjeta (NOTA: se borrarán todos los datos de la tarjeta). Si este proceso tiene éxito, los diodos **MEM** y **ERROR** se apagarán y el analizador estará listo para seguir trabajando.
- Diodo intermitente **ON** – en la tarjeta de memoria se ha detectado el archivo FIRMWARE.PQF con el archivo correcto de actualización de firmware del analizador. El usuario puede pulsar el botón START  para comenzar el proceso de actualización. Durante la actualización parpadean simultáneamente los diodos **ON** y **MEM**. Después de este proceso, el medidor se reinicia. La actualización del firmware se puede saltar presionando el botón ON/OFF  o esperando 10 segundos.

2.3 Encendido y apagado

- El analizador se enciende pulsando el botón . Se enciende el diodo verde **ON**. A continuación, el analizador realiza un auto-test y en caso de detectar errores internos se enciende el diodo **ERROR**, acompañado con una señal acústica larga (de 3 segundos), las mediciones se bloquean. Después de la auto-prueba, el medidor comienza comprobar si la conexión es correcta, si se detecta un error, parpadea cada 0,5 s el diodo **ERROR**, lo que no bloquea la posibilidad de nuevas medidas, sólo indica la incompatibilidad de la configuración del analizador con los parámetros de la red conectada.
- Si al activar el medidor se detecta la memoria completa, se enciende el diodo **MEM**, las mediciones se bloquean, sólo funciona el modo de lectura de los datos actuales.
- Si al encender, el medidor no detecta la tarjeta micro SD o detecta que está dañada, se enciende el diodo **ERROR** y **MEM** y las mediciones se bloquean.

Nota

*De la misma manera (parpadeo de diodos **ERROR** y **MEM**) el analizador se comporta cuando se inserta en el analizador de la nueva tarjeta microSD. Para formatear la tarjeta y usarla para registrar los datos, pulsar el botón . El analizador confirmará el inicio de formateo con un triple pitido. El formateo elimina todos los contenidos actuales de la tarjeta. Si el formato se ha completado correctamente, los diodos **ERROR** y **MEM** se apagarán y el analizador estará listo para seguir trabajando.*

- Si la prueba de conexión se ha realizado correctamente, al presionar  el medidor pasa al registro de acuerdo con el modo programado en el PC.
- El analizador se apaga al mantener pulsado el botón  durante 2 segundos, si no está activado el bloqueo de botones o del registro.

2.4 Función del apagado automático

Si el aparato durante al menos 30 minutos trabaja con la alimentación de la batería (sin alimentación de red) y no está en el modo de registro ni está conectado al ordenador, se apaga automáticamente para que la batería no se descargue.

El analizador se apaga automáticamente cuando la batería está completamente descargada. Este apagado de emergencia está precedido por la iluminación del diodo **BATT** durante 5 s y se lleva a cabo independientemente del modo en el que se encuentra el analizador. El registro se detiene en este caso. Cuando vuelve la tensión de alimentación, el registro se reinicia.

2.5 Conexión con PC y transmisión de datos

Al encender el medidor con el botón  el puerto USB está siempre activo.

- En el modo de lectura de los datos actuales, la actualización de datos se produce más de una vez cada 1 segundo en el programa del ordenador.
- Durante el registro es posible transmitir los datos ya almacenados en la memoria. Los datos se leen hasta el inicio de la transmisión.
- Durante el registro es posible ver los parámetros de red en el ordenador:
 - valores instantáneos de corriente, tensión, todas las potencias, valores sumarios para las tres fases,
 - armónicos y THD,
 - asimetría,
 - diagramas fasoriales para tensiones y corrientes,
 - transcurros de corriente y tensión dibujados en tiempo real.

- Durante la conexión con el PC, el botón  se bloquea a menos que el analizador trabaje en el activado modo de bloqueo de botones (p. ej. durante el registro), entonces también está bloqueado el botón .
- Para conectarse con el analizador se debe introducir su código PIN. El código predeterminado es 000 (tres cifras cero). El código PIN se puede cambiar mediante la aplicación *Sonel Analysis*.
- Si se introduce tres veces el código PIN incorrecto, se bloquea la transmisión de datos durante 10 minutos. Después de este tiempo es posible introducir de nuevo el código PIN.
- Si después de conectar al PC durante 30 segundos no tiene lugar ningún intercambio de datos entre el analizador y el ordenador, el analizador sale del modo de transmisión de datos y termina la conexión.

Notas

- *Si mantiene pulsado durante 5 segundos los botones  y  causa que se ajuste el código PIN predeterminado (000).*
- *Si durante el registro está activado el bloqueo de botones, entonces este bloqueo tiene una prioridad mayor (primero hay que desbloquear de emergencia los botones para reajustar de emergencia el código PIN). El procedimiento se describe en otra sección.*

El USB es una interfaz constantemente activa y no hay manera de desactivarla. Para conectarse con el analizador es necesario conectarse por el cable USB al ordenador (el puerto USB en el analizador se encuentra en el lado izquierdo y está protegido por una tapa estanca). Antes en el ordenador se debe instalar el software *Sonel Analysis* junto con los controladores. La velocidad de transmisión es de hasta 921,6 kbit/s.

2.6 Indicación de una conexión errónea

Durante el trabajo, el analizador en modo continuo controla los parámetros medidos respecto al cumplimiento de la configuración actual. Sobre la base de varios criterios enumerados a continuación, el analizador controla la luz del diodo **ERROR**. Si el analizador no ha detectado incompatibilidad, este diodo permanece apagado. Si al menos uno de los criterios indica un posible problema, el diodo **ERROR** empieza a parpadear.

Los criterios utilizados por el analizador que detectan el error de conexión son los siguientes:

- desviación de la tensión RMS más que $\pm 15\%$ del valor nominal,
- desviación del ángulo de fase de la componente fundamental de tensión más de $\pm 30^\circ$ respecto al valor teórico con carga resistiva y equilibrada de la red (ver nota más abajo),
- desviación del ángulo de fase de la componente fundamental de corriente más que $\pm 55^\circ$ respecto al valor teórico con carga resistiva y equilibrada de la red (ver nota más abajo),
- desviación del valor de frecuencia de red más que $\pm 10\%$ del valor nominal de la frecuencia,
- en los sistemas trifásicos de 3 y 4 cables, el analizador también calcula la suma de todas las corrientes (valores instantáneos) y verifica si el total es cero. Esto ayuda a determinar si todas las sondas de corriente están conectadas correctamente (es decir, flechas en las sondas de corriente orientadas hacia la carga). Si la suma actual calculada del valor RMS es superior al 0,3% de I_{nom} , se trata como un error y parpadea el LED **ERROR**.

Nota

La detección de error de fase requiere que la componente fundamental sea mayor o igual al 5% de la tensión nominal o el 1% del rango de corriente nominal. Si esta condición no se cumple, no se comprueba la exactitud de los ángulos.

2.7 Advertencia de una tensión o corriente demasiado alta

Durante el trabajo, el analizador controla de forma continua las tensiones y corrientes conectados a las entradas de medición. Si la tensión en cualquiera de las fases activas excede un 20% el valor nominal de la tensión ($>120\% U_{NOM}$) establecida en la configuración de medición, se activa una señal continua de dos tonos. Lo mismo se refiere a las corrientes - se activa una alarma si la corriente medida en cualquiera de los canales activos exceda un 20% la corriente nominal (rango de la pinza; $>120\% I_{NOM}$). En este caso, hay que comprobar si el voltaje y la corriente en la red está dentro del rango de tensiones y corrientes permitidas para el analizador, también se puede comprobar si la configuración del analizador es correcta y cambiarla.

2.8 Realización de mediciones

2.8.1 Inicio y detención del registro

Hay tres modos de iniciar el registro:

- inicio inmediato - manualmente pulsando el botón  después de configurar el medidor mediante el PC - se enciende el diodo **LOG**,
- de acuerdo con el tiempo programado en el PC, en este caso la pulsación del botón  no inicia el registro (el medidor espera el primer tiempo y se activa solo). El diodo **LOG** está encendido de forma continua en modo de espera, después del inicio el diodo parpadea,
- mediante el umbral, después de exceder cualquier umbral de evento establecido en la configuración, la pulsación del botón  cambia el medidor al modo de mediciones normales, pero el registro de archivos se inicia solamente después de detectar el primer evento. El diodo **LOG** está encendido de forma continua en modo de espera, después del inicio el diodo parpadea.

El medidor puede ser activado por un evento de corriente o tensión que se establece en el programa en el PC. Los umbrales para activar el registro son los mismos que los umbrales del registro de eventos.

Final del registro:

- El registro se detiene manualmente al mantener pulsado durante un segundo el botón  o a través de la aplicación de PC.
- El registro se termina automáticamente en el modo de horario (si se ha establecido el tiempo de finalización), y en otros casos el usuario debe detenerlo (con el botón  o mediante la aplicación).
- El registro se termina automáticamente cuando la tarjeta de memoria está completamente llena.
- Después de terminar el registro, si el medidor no estaba en modo de espera, se apaga el diodo **LOG** y el medidor espera las órdenes del operario.
- Si el medidor tenía apagados los diodos durante el registro, después de terminar el registro no está encendido ningún diodo; la pulsación de cualquier botón hace que se encienda el diodo **ON**.

2.8.2 Tiempos de registro aproximados

El tiempo máximo de registro depende de muchos factores tales como: tamaño de la tarjeta de memoria, tiempo de promediación, tipo de red, número de parámetros registrados, registro de oscilogramas, detección de eventos, así como propios umbrales de eventos. Algunas configuraciones escogidas se presentan en la Tabla 3. En la última columna se muestran los tiempos de registro aproximados para la tarjeta de memoria de 2 GB. Las configuraciones de ejemplo incluyen la medición de corriente I_N .

Tabla 3. Tiempos de registro aproximados para varias configuraciones de ejemplo.

Tipo de configuración/ parámetros registrados	Tiempo para el cálculo de la media	Tipo de red (medición de corrientes activa)	Eventos	Formas de onda de eventos	Formas de onda después de promediar	Tiempo aproximado de registro en caso de 2 GB de espacio asignado
según EN 50160	10 min	3-fásico estrella	• (1000 eventos)	• (1000 eventos)		60 años
según el perfil "Tensiones y corrientes"	1 s	3-fásico estrella				270 días
según el perfil "Potencias y armónicos"	1 s	3-fásico estrella				23 días
según el perfil "Potencias y armónicos"	1 s	3-fásico estrella	• (1000 eventos)	• (1000 eventos)		22,5 días
activados todos los parámetros posibles	10 min	3-fásico estrella				4 años
activados todos los parámetros posibles	10 s	3-fásico estrella				25 días
activados todos los parámetros posibles	10 s	1-fásico				64 días
activados todos los parámetros posibles	10 s	1-fásico	• (1000 eventos/día)	• (1000 eventos/día)		22 días

2.9 Sistemas de medición

El analizador puede ser conectado directamente e indirectamente a los siguientes tipos de red:

- monofásica (Fig. 5)
- bifásica (con bobinado dividido del transformador llamado en inglés *split phase*) (Fig. 6),
- trifásica tipo estrella con conductor neutro (Fig. 7 i Fig. 12),
- trifásica tipo estrella sin conductor neutro (Fig. 8),
- trifásica tipo triángulo (Fig. 9 i Fig. 13).

En los sistemas de tres conductores se pueden medir las corrientes con el método de Aron usando sólo dos pinzas que miden las corrientes lineales I_{L1} y I_{L3} . La corriente I_{L2} se calcula entonces según la relación:

$$I_{L2} = -I_{L1} - I_{L3}$$

Este método se puede utilizar en los sistemas tipo triángulo (Fig. 10) y estrella sin conductor neutro (Fig. 11).

Nota

Dado que los canales de medición de tensión se refieren a la entrada N, en los sistemas, en los cuales el conductor neutro no existe, es necesario conectar la entrada N a terminal L3 de la red. En este sistema no es necesario conectar la entrada L3 del analizador a la red examinada. Esto se presenta en la Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11 y Fig. 13 (sistemas de tres conductores tipo estrella y triángulo).

En los sistemas con el conductor neutro se puede activar adicionalmente la medición de la corriente en este conductor después de conectar la pinza adicional en el canal I_N . Esta medición se realiza después de activar la opción **Corriente en el conductor N** en la configuración del punto de medición.

Nota

*Para calcular correctamente la potencia aparente total S_e y el factor de potencia total PF en el sistema trifásico con 4 conductores, es necesaria la medición de corriente en el conductor neutro. En tal caso siempre es necesario activar la opción **Corriente en el conductor N** y conectar cuatro pinzas. Se puede encontrar más información en la sección 6.4.5.*

Prestar atención a la orientación de las pinzas (flexibles y rígidas). Las pinzas deben ser puestas de tal manera que la flecha colocada en las pinzas esté orientada hacia la carga. La verificación puede realizarse controlando la medición de la potencia activa, en la mayoría de tipos de receptores pasivos la potencia activa tiene el signo positivo. En caso de conexión incorrecta de las pinzas se puede cambiar la polaridad de las pinzas elegidas mediante la aplicación Sonel Analysis.

Las figuras siguientes presentan esquemáticamente los modos de conexión del analizador a la red examinada según su tipo.

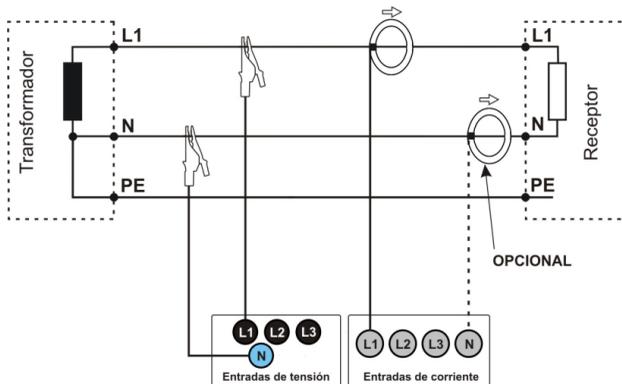


Fig. 5. Esquema de conexión – sistema monofásico.

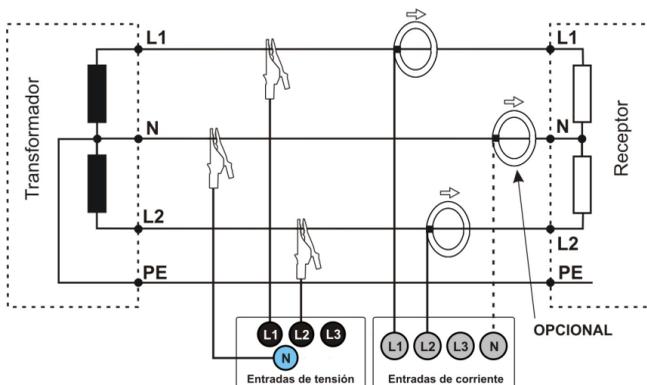


Fig. 6. Esquema de conexión – sistema bifásico.

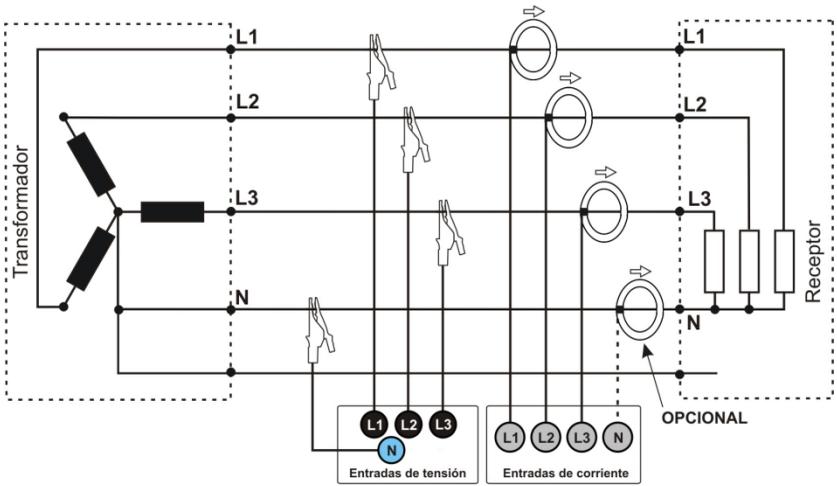


Fig. 7. Esquema de conexión – sistema trifásico tipo estrella con neutro.

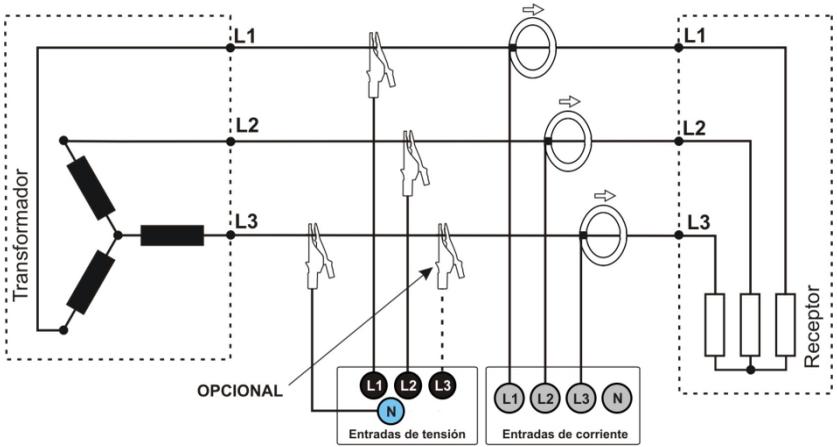


Fig. 8. Esquema de conexión – sistema trifásico tipo estrella sin neutro.

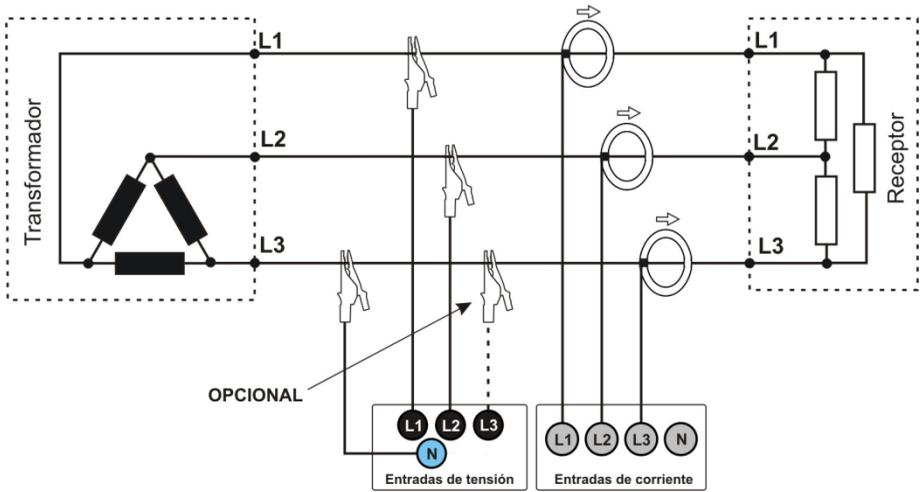


Fig. 9. Esquema de conexión – sistema trifásico tipo triángulo.

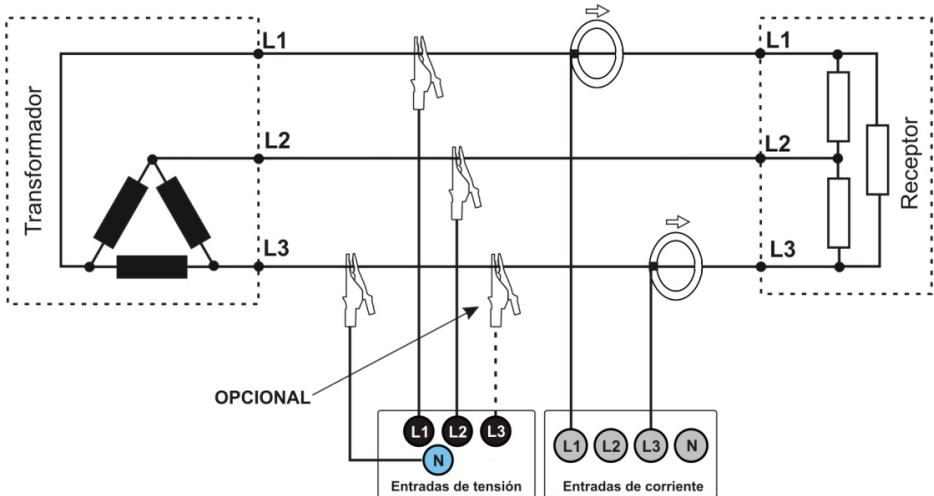


Fig. 10. Esquema de conexión – sistema trifásico tipo triángulo (medición de corrientes mediante el método de Aron).

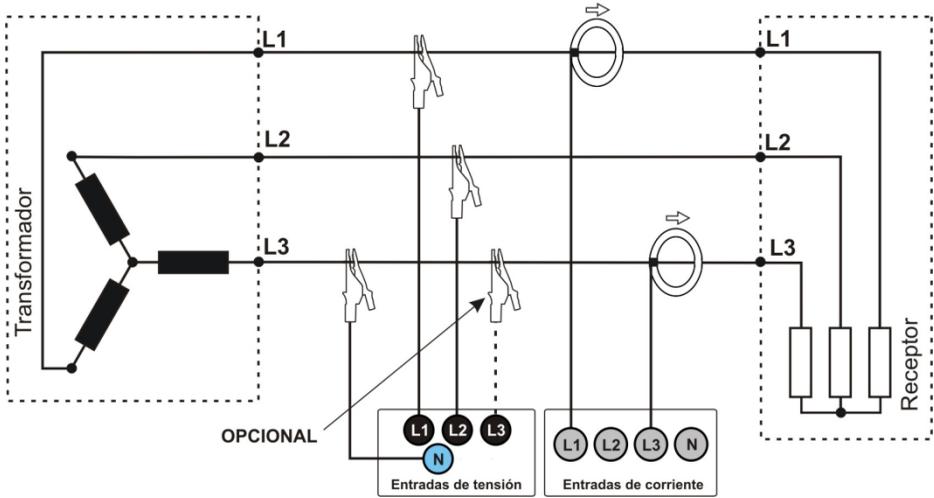


Fig. 11. Esquema de conexión – sistema trifásico tipo estrella sin neutro (medición de corrientes mediante el método de Aron).

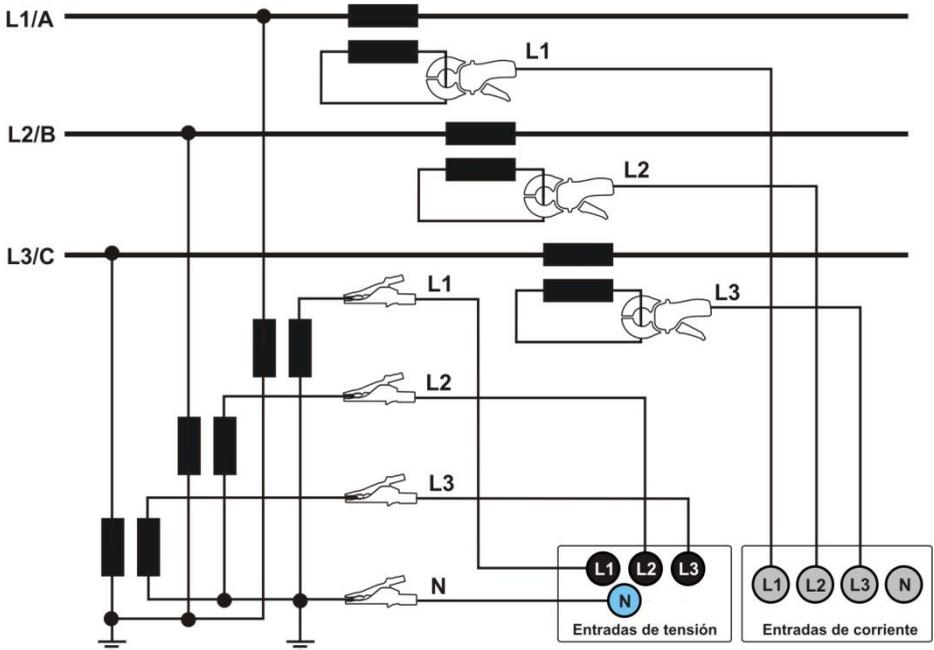


Fig. 12. Esquema de conexión - una medición indirecta SN en el sistema de estrella de 3 fases.

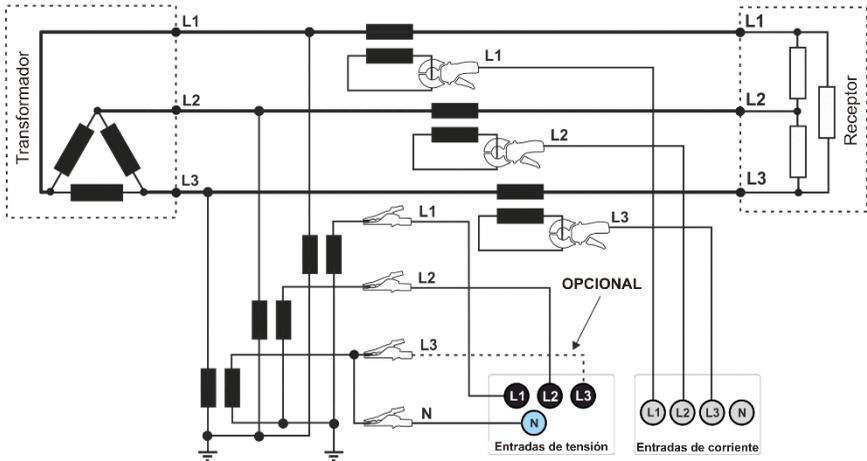


Fig. 13. Esquema de conexión - una medición indirecta SN en el sistema de triángulo de 3 fases.

2.10 Corriente de arranque

Esta función permite el registro de valores de semiperíodo de tensión y de corriente en tiempo de 60 s. Después el registro se terminará automáticamente. Antes de la medición se debe ajustar el tiempo de agregación a *Semiperíodo*. Los otros ajustes y el sistema de medición son cualquiera.

2.11 Bloqueo de botones

En la aplicación de PC es posible ajustar la opción de bloqueo de botones después del inicio de registro. Esto protege el analizador contra la detención de registro por personas no autorizadas. Para desbloquear los botones se deben seguir los siguientes pasos:

- pulsar tres veces seguidos el botón en los intervalos de 0,5 s a 1 s,
- a continuación, pulsar el botón en el intervalo de 0,5 s a 1 s,

El sonido al pulsar los botones es como para los botones inactivos y después de toda la secuencia el medidor emite un pitido doble.

2.12 Modo de espera

El programa de ordenador permite la activación del modo de espera. Cuando se inicia el registro, el medidor apaga los diodos después de 10 s. A partir de este momento son posibles los casos:

- activación inmediata – después de apagar todos los diodos, cada 10 s parpadea (durante 0,5 s) el diodo **LOG** que indica el registro,
- activación según eventos – después del apagado parpadea el diodo **LOG** cada 30 s en el estado de espera, cuando se inicia el registro el diodo **LOG** parpadea cada 10 s,
- activación según horario – después del apagado parpadea el diodo **LOG** cada 30 s en el estado de espera, cuando se inicia el registro el diodo **LOG** parpadea cada 10 s.

Además, en los casos anteriores:

- si el usuario detiene el registro pulsando , se encienden los diodos, a menos que el usuario reinicie el siguiente registro,
- si el analizador termina el registro porque se ha acabado la memoria en la tarjeta o se ha terminado el horario, los diodos permanecen apagados.

La pulsación de cualquier botón (durante corto tiempo) hace que se encienda el diodo **ON** (y posiblemente los otros diodos como **MEM** dependiendo de su estado) y se active la función dada, si está disponible.

2.13 Actualización de firmware

El software interno del analizar (en inglés *firmware*) debe actualizarse periódicamente porque las actualizaciones mejoran los errores percibidos o introducen nuevas funciones. Cuando se actualiza el software del analizador, se debe comprobar si hay una nueva versión del programa *Sonel Analysis* (y viceversa), y si es así, también debe ser actualizado.

2.13.1 Actualización automática

Método automático (recomendado) se lleva a cabo utilizando el software *Sonel Analysis*. Si en la configuración del programa el usuario tiene activada la opción **Comprobar actualizaciones**, la aplicación se conecta al servidor de actualización al activarla. Si hay actualizaciones disponibles, se muestran (junto con una lista de cambios), y el usuario puede confirmar la descarga. Comprobar si hay actualizaciones disponibles también se puede ejecutar manualmente seleccionando en el menú del programa **Ayuda → Actualizaciones on-line**. Si la actualización del firmware está disponible y se ha descargado, se puede actualizar el firmware del medidor. Para ello:

1. Antes de actualizar se deben guardar todos los datos del analizador al ordenador (descargar y guardar los datos registrados en el disco).
2. Conectar el analizador a la red eléctrica.
3. Conectar el analizador a el ordenador mediante un cable USB y usar la aplicación. El programa *Sonel Analysis* debe inmediatamente después de la conexión mostrar un mensaje acerca de la posibilidad de actualizar el firmware (para que esto suceda es necesario que en la configuración del programa esté activada la opción **"Comprobar las versiones de firmware del medidor al conectar"**).
4. Después de confirmar una ejecución de actualización se debe esperar a la finalización del proceso.
5. **NOTA:** Después de una actualización correcta, es necesario volver a programar el analizador antes de comenzar el registro con el fin de evitar incompatibilidad en los datos registrados.

2.13.2 Actualización manual

La actualización manual requiere que se guarde el archivo de firmware correspondiente en la tarjeta de memoria y se active la actualización con el botón.

1. Antes de actualizar se deben guardar todos los datos del analizador al ordenador (descargar y guardar los datos registrados en el disco).
2. Conectar el analizador a la red eléctrica.
3. Desde el sitio web del fabricante www.sonel.pl, se debe descargar el archivo con el nuevo firmware. Si el archivo está comprimido hay que extraer el archivo FIRMWARE.PQF.
4. El archivo FIRMWARE.PQF debe estar guardado en la carpeta de la tarjeta microSD usando el lector de tarjetas externo.
5. Insertar la tarjeta en el analizador. El diodo **ON** debe parpadear, lo que indica que se reconoce el archivo de firmware y que está listo para iniciar la actualización.
6. Pulsar el botón **START**  con el fin de iniciar la actualización. Si el botón **START** no se pulsa en 10 segundos, la actualización se ignora. El proceso se indica mediante el parpadeo de los diodos **ON** y **MEM**.
7. **NOTA:** Después de una actualización correcta, es necesario volver a programar el analizador antes de comenzar el registro con el fin de evitar incompatibilidad en los datos registrados.

3 Programa "Sonel Analysis"

El programa "Sonel Analysis" es la aplicación necesaria para trabajar con el analizador PQM-700. Que permite:

- configuración del analizador,
- lectura de datos del dispositivo,
- visualización de la red en tiempo real,
- eliminación de datos en el analizador,
- presentación de datos en forma de tablas,
- presentación de datos en forma de diagramas,
- análisis de los datos según la norma EN 50160 (informes), regulación del sistema y otras condiciones de referencia definidas por el usuario,
- funcionamiento independiente de muchos dispositivos,
- actualización a las nuevas versiones del firmware de analizadores y de la propia aplicación.

El manual detallado del programa *Sonel Analysis* está disponible en un documento separado (también puede descargarse de la página del fabricante www.sonel.pl).

4 Estructura y métodos de medición

4.1 Entradas de tensión

La estructura del bloque de las entradas de tensión se muestra en la Fig. 14. Tres entradas de fase L1, L2, L3 tienen una línea de referencia común, que es el cable N (neutro). Esta configuración de entradas reduce el número de cables necesarios para conectar el analizador en la más amplia opción hasta cuatro. Esta figura también muestra que el circuito de alimentación del analizador es independiente de los circuitos de medición.

La fuente de alimentación tiene el rango nominal de tensiones de entrada entre 100...415 V AC y tiene los terminales separados.

El analizador tiene un rango de tensión, con la tensión de cresta de 1150 V (sin corte).

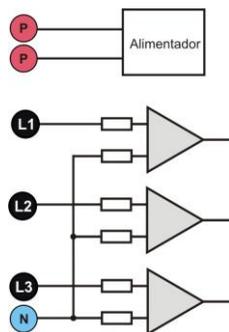


Fig. 14. Entradas de tensión y alimentador

4.2 Entradas de corriente

El analizador tiene cuatro entradas de corriente independientes con los mismos parámetros. Para cada una de ellas se pueden conectar las pinzas rígidas de corriente (CT) con salida de tensión de 1 V como estándar o las pinzas flexibles.

Una situación típica es el uso de las pinzas flexibles con un integrador electrónico incluido. Sin embargo, este analizador PQM-700 permite la conexión directa a la entrada del canal de corriente de la misma bobina de Rogowski, la integración de la señal se realiza de forma digital.

4.2.1 Integrador digital

En el analizador PQM-700 se aplicó la solución con la integración digital de la señal que viene directamente de la bobina de Rogowski. Este enfoque permite eliminar los problemas relacionados con los integradores analógicos necesarios para asegurar la precisión declarada a largo plazo y en el entorno de medición difícil. Los integradores analógicos también deben incluir los sistemas de protección contra la saturación de la salida en presencia de la tensión continua en la entrada.

El integrador ideal tiene un amplificador infinito para las señales continuas que baja con una velocidad de frecuencia de 20 dB/década. El desplazamiento de fase es constante en todo el rango de frecuencia y es de -90° .

En teoría, el amplificador infinito para la señal continua que aparece en la entrada del integrador causa la saturación de su salida cerca de la tensión de alimentación e impide su funcionamiento. En sistemas prácticos se introduce una solución para limitar el amplificador para DC hasta un valor fijo, además periódicamente pone a cero las salidas. También hay técnicas de eliminación activa de tensión continua que la mide y de nuevo la pone en la entrada pero con el signo opuesto por lo que se anula eficazmente. En inglés se usa el término "*leaky integrator*" que significa el integrador con fuga. "*Leaky integrator*" es simplemente un integrador con el condensador de resistencia de alto valor. Tal sistema es entonces el mismo que el filtro de paso bajo con una frecuencia de paso muy baja.

La aplicación digital del integrador asegura unos parámetros excelentes durante largo período, todo el procedimiento se lleva a cabo por medio de cálculos, no hay efectos del envejecimiento de los elementos, etc. Sin embargo, igual que la versión analógica aquí también puede aparecer el problema de saturación y sin ninguna prevención puede hacer inútil la integración digital. Se deben tener en cuenta tanto los amplificadores de entrada como el convertidor analógico-digital tienen un compensador finito y no deseable, que debe ser eliminado antes del proceso de integración. El software del analizador PQM-700 incluye un filtro digital cuya tarea consiste en eliminar por completo la componente continua de tensión. La señal filtrada se somete a la integración digital. La característica de fase resultante tiene unas propiedades excelentes y el desplazamiento de fase

para las frecuencias más críticas de 50 y 60 Hz es mínimo.

Proporcionar el desplazamiento de fase más pequeño entre las señales de corriente y voltaje es crucial para asegurar pequeños errores de medición de potencia. El error estimado de medición de potencia se puede expresar por la relación¹:

$$\text{Error de medición de potencia} \approx \text{error de fase (en radianes)} \times \tan(\varphi) \times 100 \%$$

donde $\tan(\varphi)$ es la tangente del ángulo entre la tensión y la corriente de sus componentes fundamentales. De la fórmula anterior se puede concluir que los errores de medición aumentan junto con la disminución del factor de desplazamiento de fase; por ejemplo, cuando el error de fase de $0,1^\circ$ y $\cos\varphi=0,5$ el error es de tan sólo del 0,3%. De todos modos, para que las mediciones de potencia sean exactas, la concordancia de las trayectorias de fase de tensión y corriente debe ser la mejor.

4.3 Muestreo de la señal

Se muestrea la señal al mismo tiempo en los ocho canales y la frecuencia sincronizada con la frecuencia del canal de tensión de alimentación de referencia. Esta frecuencia es de 10,24 kHz para la frecuencia 50 Hz y 60 Hz.

Por consiguiente, un solo período tiene 204,8 muestras para la frecuencia de 50 Hz y 170,67 muestras para 60 Hz. Se utiliza el convertidor analógico-digital de 16 bits que proporciona el sobremuestreo de 64 veces.

La atenuación analógica de 3 decibelios se ha especificado para las frecuencias de unos 12 kHz, mientras que el error de amplitud para la frecuencia máxima útil igual a 2,4 kHz (es decir, la frecuencia del 40º armónico para la red de 60 Hz) es de aprox. 0,3 dB. El desplazamiento de fase para la misma frecuencia es menor que 15° . La atenuación en la banda de parada es mayor de 75 dB.

Se debe tener en cuenta que para la correcta medición del desplazamiento de fase entre los armónicos de tensión respecto a los armónicos de corriente no es significativo el desplazamiento absoluto de fase respecto a la frecuencia fundamental, pero la conformidad de las características de fase de las trayectorias de tensión y corriente. El mayor error de diferencia de fase para $f = 2,4$ kHz es hasta 15° . Este error disminuye con la disminución de la frecuencia que nos interesa.

¹ Current sensing for energy metering, William Koon, Analog Devices, Inc.

4.4 Sincronización PLL

La sincronización de frecuencia de muestreo se llevó a cabo por medio del equipo. La señal de voltaje después de pasar a través de los circuitos de entrada se dirige al filtro de paso de banda, cuya misión es reducir el nivel de armónicos y pasar sólo la componente fundamental de tensión. A continuación, la señal se dirige a los circuitos del bucle de fase como una señal de referencia. El sistema PLL genera una frecuencia que es un múltiplo de la frecuencia de referencia requerida para el convertidor analógico-digital.

La necesidad de la aplicación del bucle de enganche de fase resulta directamente de los requisitos de la norma IEC 61000-4-7 que describe la metodología y los errores aceptables en la medición de los armónicos. Esta norma requiere que la ventana de medición, que es la base para una medición y la evaluación del contenido de armónicos, sea igual a la duración de 10 períodos de la red energética en las instalaciones de 50 Hz y 12 períodos para 60 Hz. En ambos casos, esto corresponde a unos 200 ms. Dado que la frecuencia de la fuente de alimentación puede estar sujeta a cambios periódicos y fluctuaciones, la duración de la ventana puede no ser exactamente igual a 200 ms, p.ej. para la frecuencia de 51 Hz corresponde a unos 196 ms.

La norma también recomienda que los datos no sean sometidos al sistema de ventanas antes de introducir la transformada de Fourier (con el fin de extraer los componentes espectrales). Falta de sincronización de frecuencia y situación en la que en la transformada FFT se realizan las muestras del número incompleto de períodos pueden conducir a la fuga espectral. Este fenómeno hace que la línea de armónico se aplique también a otras líneas de interarmónicos adyacentes, lo que puede conducir a la pérdida de información sobre el nivel y la potencia reales de la línea examinada. Se permite la posibilidad de la utilización de ventana de ponderación Hanna que reduce los efectos adversos de la fuga espectral, pero esto sólo se limita a la situación en la que el bucle PLL ha perdido la sincronización.

La norma IEC 61000-4-7 especifica con precisión el requerido bloque de sincronización. Esto se expresa de la siguiente manera: el tiempo entre el flanco ascendente del primer impulso de muestreo y $(M+1)$ de este impulso (donde M es el número de muestras en la ventana de medición) debe ser igual a la duración del número especificado de períodos en la ventana de medición (10 o 12), con un máximo error permisible de $\pm 0,03\%$. Para explicarlo en términos más simples, se analiza el siguiente ejemplo. Tomando en cuenta la frecuencia de red de 50 Hz, la ventana de medición dura exactamente 200 ms. Si el primer impulso de muestreo se produce exactamente en el tiempo $t = 0$, entonces el primer impulso de muestreo de la ventana de medición siguiente debe aparecer en el momento $t = 200 \pm 0,06$ ms. Estos ± 60 μ s es la desviación admisible del flanco de muestreo. La norma también define la frecuencia mínima recomendada en la que se debe mantener la precisión indicada anteriormente de la sincronización y la define $\pm 5\%$ de la frecuencia nominal, es decir, 47,5...52,5 Hz y 57...63 Hz respectivamente, para las redes de 50 Hz y 60 Hz.

Otra cuestión es el rango de tensión de entrada para que el sistema PLL funcione correctamente. La norma 61000-4-7 no menciona aquí indicaciones ni requisitos específicos. El PQM-700 para la operación apropiada del sistema PLL requiere la tensión superior a 10 V a la entrada L1-N.

4.5 Medición de frecuencia

La señal para la medición de los valores de frecuencia de 10 segundos viene del canal de voltaje L1. Es el mismo señal que se utiliza para sincronizar el bucle PLL. Esta señal de canal L1 se aplica al filtro de paso de banda de segundo orden cuyo paso de banda se fijó en el rango de 40..70 Hz. Este filtro sirve para reducir el nivel de armónicos. A continuación, de la forma de onda filtrada se crea la señal cuadrada. Durante el ciclo de medición de 10 segundos se cuenta el número de períodos de la señal y su duración. Los intervalos de 10 segundos se determinan por el reloj de tiempo real (que es un múltiplo entero del tiempo de 10 segundos). La frecuencia se calcula como la relación del número de períodos contados y su duración.

4.6 Método de medición de los componentes armónicos

Los armónicos se miden de acuerdo con la norma IEC 61000-4-7. Esta norma establece la forma de calcular los armónicos particulares.

Todo el proceso se compone de varias etapas:

- muestreo sincrónico (10/12 períodos),
- análisis FFT (Transformada Rápida de Fourier),
- agrupación.

Según la FFT se analiza la ventana de medición de 10/12 períodos (unos 200 ms). Como resultado, recibimos un conjunto de líneas espectrales desde la frecuencia 0 Hz (DC) hasta el 40º armónico (aprox. 2,0 kHz para 50 Hz o 2,4 kHz para 60 Hz). La distancia entre las líneas sucesivas depende directamente de la duración de la ventana de medición y es aproximadamente de 5 Hz.

El analizador PQM-700 recoge 2.048 muestras por ventana de medición (para la frecuencia de 50 Hz y 60 Hz) por lo tanto se asegura el cumplimiento del requisito para la FFT para que el número de muestras sometido a transformar sea una potencia de la cifra 2.

Es importante mantener una sincronización de la frecuencia de muestreo constante con la red. La FFT se puede realizar sólo con los datos que contienen el múltiplo entero del período de la red. El cumplimiento de este requisito es necesario para minimizar la llamada pérdida de espectro que falsifica la información sobre los niveles reales de bandas espectrales. El analizador PQM-700 cumple con estos requisitos, debido a que la frecuencia de muestreo se estabiliza con el sistema de bucle de fase PLL.

Ya que la frecuencia de red puede tener fluctuaciones temporales, la norma prevé la agrupación de las líneas principales de los armónicos junto con las líneas en sus inmediaciones. La razón es que la energía de componentes puede pasar parcialmente a las componentes interarmónicas adyacentes.

Hay dos métodos de agrupación:

- grupo armónico (incluye la línea principal y cinco o seis componentes interarmónicas adyacentes),
- subgrupo armónico (incluye la línea principal y una línea adyacente a cada lado).

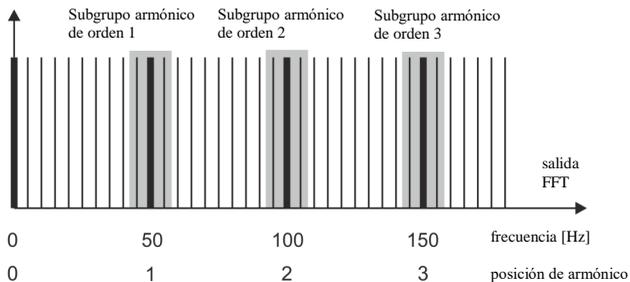


Fig. 15. Determinación de subgrupos de armónicos (red de 50 Hz).

Ejemplo

Para calcular la componente del tercer armónico en la red de 50 Hz se debe tomar en cuenta la línea principal de 150 Hz y las líneas adyacentes de 145 Hz y 155 Hz. La amplitud resultante se calcula usando el método RMS.

La norma IEC 61000-4-30 recomienda que los analizadores de red utilicen el método de los subgrupos armónicos.

4.7 Detección de eventos

El PQM-700 ofrece una amplia gama de posibilidades de detección de eventos en la red medida. El evento es la situación en la que el valor del parámetro elegido de la red excede el umbral definido por el usuario.

El hecho de aparición del evento se registra en la tarjeta de memoria y contiene la información como:

- tipo de parámetro,
- canal en el que se produjo el evento,
- inicio y final de evento,
- valor umbral fijado por el usuario,
- valor del parámetro extremo medido durante el evento,
- valor medio del parámetro medido durante el evento.

Dependiendo del tipo de parámetro se puede establecer uno, dos o tres umbrales, que serán controlados por el analizador. La tabla contiene todos los parámetros para que los eventos puedan ser detectados dependiendo del tipo de umbral.

Tabla 4. Tipos de umbrales de eventos para los parámetros particulares.

Parámetro		Interrupción	Hueco	Subida	Mínimo	Máximo
U	Valor eficaz de tensión	•	•	•		
U _{DC}	Componente constante de tensión					•
f	Frecuencia				•	•
CF U	Factor de pico de tensión				•	•
u ₂	Factor de desequilibrio de componente de secuencia negativa de tensión					•
P _{st}	Indicador de parpadeo de luz P _{st}					•
P _{It}	Indicador de parpadeo de luz P _{It}					•
I	Valor eficaz de corriente				•	•
CF I	Factor de pico de corriente					
i ₂	Factor de desequilibrio de componente de secuencia negativa de corriente					•
P	Potencia activa				•	•
Q ₁ , Q _B	Potencia reactiva				•	•
S	Potencia aparente				•	•
D, S _N	Potencia de distorsión				•	•
PF	Factor de potencia				•	•
cosφ	Factor de desplazamiento de fase				•	•
tanφ	Factor de tangenteφ				•	•
E _{P+} , E _{P-}	Energía activa (consumida y devuelta)					•
E _{Q+} , E _{Q-}	Energía reactiva (consumida y devuelta)					•
E _S	Energía aparente					•
THD _F U	Factor THD _F de tensión					•
U _{h2..U_{h40}}	Amplitudes de armónicos de tensión (orden n = 2...40)					•
THD _F I	Factor THD _F de corriente					•
I _{h2..I_{h40}}	Amplitudes de armónicos de corriente (orden n = 2...40)					•

Algunos parámetros pueden tener tanto los valores positivos como negativos. Un ejemplo es la potencia activa, la potencia reactiva y el factor de potencia. Dado que el umbral de detección de eventos sólo puede ser positivo, con el fin de asegurar la correcta detección de eventos para estos parámetros, el analizador compara los valores absolutos de estos parámetros con el umbral establecido.

Ejemplo

El umbral de evento de la potencia activa se establece en 10 kW. Si la carga tiene el carácter de generador, la potencia activa tendrá un signo negativo después de conectar correctamente la pinza de corriente. Si el valor absoluto medido de la potencia activa supera el umbral, es decir, 10 kW (p.ej. 11 kW) se registrará el evento del que se ha superado el valor de la máxima potencia activa.

Hay dos tipos de parámetros: el valor eficaz de tensión y el valor eficaz de corriente pueden generar eventos y el usuario puede completarlos con el registro de las ondas instantáneas (oscilogramas).

Las formas de onda de canales activos (de tensión y corriente) se almacenan por el analizador al principio y al final del evento. En ambos casos, se registran seis períodos: dos antes del comienzo (final) del evento y cuatro después del comienzo (final). Las formas de onda se almacenan en formato de 8 bits con una frecuencia de muestreo de 10,24 kHz.

La información sobre el evento es guardada en el momento de finalizar. En algunos casos puede ocurrir que en el momento de finalizar el registro algún evento estaba activo (p.ej. duraba el hueco de tensión). Información sobre este evento también se guarda pero con las siguientes modificaciones:

- no hay tiempo de finalización de evento,
- el valor extremo se calcula sólo para el período hasta la detención de registro,
- no se menciona el valor medio,
- sólo está disponible el oscilograma de comienzo para los eventos relacionados con la tensión o la corriente eficaz.

Para evitar la detección repetida de eventos, cuando el valor del parámetro fluctúa en torno al umbral, se introdujo la histéresis de detección de eventos definida por el usuario. Se la define en porcentaje de la siguiente manera:

- para los eventos del valor eficaz de tensión es un porcentaje del valor nominal de tensión (p.ej. 2% de 230 V, es decir, 4,6 V),
- para los eventos del valor eficaz de corriente es el porcentaje del rango nominal de corriente (p.ej. para la pinza C-4 y la falta de transformadores de corriente, la histéresis del 2% es igual a $0,02 \times 1000 \text{ A} = 20 \text{ A}$,
- para los otros parámetros, la histéresis se define como el porcentaje del umbral máximo (por ejemplo si el umbral máximo para el factor de cresta de corriente se establece en 4,0, entonces la histéresis es $0,02 \times 4,0 = 0,08$).

5 Fórmulas de cálculo

5.1 Red monofásica

Red monofásica			
Parámetro			Método de cálculo
Nombre	Símbolo	Unidad	
Tensión eficaz (True RMS)	U_A	V	$U_A = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U_i^2}$ <p>donde U_i es la siguiente muestra de la tensión U_{A-N} $M = 2048$ para la red de 50 Hz y 60 Hz</p>
Componente constante de tensión	U_{ADC}	V	$U_{ADC} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U_i$ <p>donde U_i es siguiente muestra de la tensión U_{A-N} $M = 2048$ para la red de 50 Hz y 60 Hz</p>
Frecuencia	f	Hz	número de los períodos enteros de tensión U_{A-N} contados durante el intervalo de 10 s de tiempo de reloj dividido por la duración total de los períodos completos
Corriente eficaz (True RMS)	I_A	A	$I_A = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I_i^2}$ <p>donde I_i es siguiente muestra de la corriente I_A $M = 2048$ para la red de 50 Hz y 60 Hz</p>
Componente constante de corriente	I_{ADC}	A	$I_{ADC} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I_i$ <p>donde I_i es siguiente muestra de la corriente I_A $M = 2048$ para la red de 50 Hz y 60 Hz</p>
Potencia activa	P	W	$P = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U_i I_i$ <p>donde U_i es siguiente muestra de la tensión U_{A-N} I_i es siguiente muestra de la corriente I_A $M = 2048$ para la red de 50 Hz y 60 Hz</p>
Potencia reactiva definida por Budeanu	Q_B	var	$Q_B = \sum_{h=1}^{50} U_h I_h \sin \varphi_h$ <p>donde U_h es $h^{\text{º}}$ armónico de tensión U_{A-N} I_h es $h^{\text{º}}$ armónico de corriente I_A φ_h es $h^{\text{º}}$ ángulo entre los armónicos U_h y I_h</p>
Potencia reactiva de la componente fundamental	Q_1	var	$Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1$ <p>donde U_1 es la componente fundamental de tensión U_{A-N} I_1 es la componente fundamental de corriente I_A φ_1 es el ángulo entre las componentes fundamentales U_1 y I_1</p>
Potencia aparente	S	VA	$S = U_{ARMS} I_{ARMS}$
Potencia aparente de distorsión	S_N	VA	$S_N = \sqrt{S^2 - (U_1 I_1)^2}$
Potencia de distorsión definida por Budeanu	D_B	var	$D_B = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2}$
Factor de potencia	PF	-	$PF = \frac{P}{S}$ <p>Si $PF < 0$ carga tiene el carácter de generador Si $PF > 0$ la carga tiene el carácter de receptor</p>

Factor de desplazamiento de fase	$\cos\varphi$ DPF	-	$\cos\varphi = DPF = \cos(\varphi_{U_1} - \varphi_{I_1})$ donde φ_{U_1} es el ángulo absoluto de la componente fundamental de la tensión U_{A-N} φ_{I_1} es el ángulo absoluto de la componente fundamental de la corriente I_A
Tangente φ (4 cuadrantes)	$\tan\varphi_{(L+)}$	-	$\tan\varphi_{(L+)} = \frac{\Delta E_{Q(L+)}}{\Delta E_{P+}}$ donde: $\Delta E_{Q(L+)}$ es el aumento de la energía reactiva $E_{Q(L+)}$ (Budeanu/IEEE-1459) en este periodo de cálculo de la media, ΔE_{P+} es el aumento de la energía activa consumida E_{P+} en este periodo de cálculo de la media
	$\tan\varphi_{(C-)}$	-	$\tan\varphi_{(C-)} = -\frac{\Delta E_{Q(C-)}}{\Delta E_{P+}}$ donde: $\Delta E_{Q(C-)}$ es el aumento de la energía reactiva $E_{Q(C-)}$ (Budeanu/IEEE-1459) en este periodo de cálculo de la media, ΔE_{P+} es el aumento de la energía activa consumida E_{P+} w danym przedziale uśredniania
	$\tan\varphi_{(L-)}$	-	$\tan\varphi_{(L-)} = \frac{\Delta E_{Q(L-)}}{\Delta E_{P+}}$ donde: $\Delta E_{Q(L-)}$ es el aumento de la energía reactiva $E_{Q(L-)}$ (Budeanu/IEEE-1459) en este periodo de cálculo de la media, ΔE_{P+} es el aumento de la energía activa consumida E_{P+} w danym przedziale uśredniania
	$\tan\varphi_{(C+)}$	-	$\tan\varphi_{(C+)} = -\frac{\Delta E_{Q(C+)}}{\Delta E_{P+}}$ donde: $\Delta E_{Q(C+)}$ es el aumento de la energía reactiva $E_{Q(C+)}$ (Budeanu/IEEE-1459) en este periodo de cálculo de la media, ΔE_{P+} es el aumento de la energía activa consumida E_{P+} en este periodo de cálculo de la media
Componentes armónicas de tensión y corriente	U_{hx} I_{hx}	V A	método de los subgrupos armónicos según IEC 61000-4-7 x (orden del armónico) = 1..40
Factor de distorsión armónica de tensión se refiere a la componente fundamental	$THDU_F$	-	$THDU_F = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} \times 100\%$ donde U_h es h^o armónico de tensión U_{A-N} U_1 es la componente fundamental de tensión U_{A-N}
Factor de distorsión armónica de tensión se refiere al valor eficaz	$THDU_R$	-	$THDU_R = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_{ARMS}} \times 100\%$ donde U_h es h^o armónico de tensión U_{A-N}
Factor de distorsión armónica de corriente se refiere a la componente fundamental	$THDI_F$	-	$THDI_F = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_1} \times 100\%$ donde I_h es h^o armónico de corriente I_A I_1 es la componente fundamental de corriente I_A
Factor de distorsión armónica de corriente se refiere al valor eficaz	$THDI_R$	-	$THDI_R = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_{ARMS}} \times 100\%$ donde I_h es h^o armónico de corriente I_A
Factor TDD	TDD	-	$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_L} \times 100\%$ donde I_h es h^o armónico de corriente I_A I_L es la corriente demandada (en modo automático I_L es el valor medio máximo de la componente fundamental de corriente buscada entre todos los canales de corriente medidos de todo el rango de registro)

5 Fórmulas de cálculo

Factor de pico de tensión	CFU	-	$CFU = \frac{\max. U_i }{U_{ARMS}}$ <p>$\max. U_i$ Cuando el operario expresa el valor más grande de los valores absolutos de muestras de tensión U_{A-N} $i = 2048$ para la red de 50 Hz y 60 Hz</p>
Factor de pico de corriente	CFI	-	$CFI = \frac{\max. I_i }{I_{ARMS}}$ <p>$\max. I_i$ Cuando el operario expresa el valor más grande de los valores absolutos de muestras de corriente I_A $i = 2048$ para la red de 50 Hz y 60 Hz</p>
Flicker de corta duración	P_{St}	-	calculado de acuerdo con la norma IEC 61000-4-15
Flicker de larga duración	P_{LT}	-	$P_{LT} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{STi}^3}{N}}$ <p>donde P_{STi} es el siguiente indicador de parpadeo de corta duración</p>
Energía activa (consumida y devuelta)	E_{P+} E_{P-}	Wh	$E_{P+} = \sum_{i=1}^m P_+(i)T(i)$ $P_+(i) = \begin{cases} P(i) & \text{para } P(i) > 0 \\ 0 & \text{para } P(i) \leq 0 \end{cases}$ $E_{P-} = \sum_{i=1}^m P_-(i)T(i)$ $P_-(i) = \begin{cases} P(i) & \text{para } P(i) < 0 \\ 0 & \text{para } P(i) \geq 0 \end{cases}$ <p>donde: i es el siguiente número de la ventana de medición de 10/12 períodos $P(i)$ representa el valor de la potencia activa P calculada en la i^{a} ventana de medición $T(i)$ representa el tiempo de duración de i^{a} ventana de medición en las horas</p>
Energía reactiva (4 cuadrantes)	$E_{Q(L+)}$ $E_{Q(C-)}$ $E_{Q(L-)}$ $E_{Q(C+)}$	varh	$E_{Q(L+)} = \sum_{y=1}^m Q_{L+}(i)T(i)$ $Q_{L+}(i) = Q(i) \text{ si } Q(i) > 0 \text{ y } P(i) > 0$ $Q_{L+}(i) = 0 \text{ en otros casos}$ $E_{Q(C-)} = \sum_{y=1}^m Q_{C-}(i)T(i)$ $Q_{C-}(i) = Q(i) \text{ si } Q(i) > 0 \text{ y } P(i) < 0$ $Q_{C-}(i) = 0 \text{ en otros casos}$ $E_{Q(L-)} = \sum_{y=1}^m Q_{L-}(i)T(i)$ $Q_{L-}(i) = Q(i) \text{ si } Q(i) < 0 \text{ y } P(i) < 0$ $Q_{L-}(i) = 0 \text{ en otros casos}$ $E_{Q(C+)} = \sum_{y=1}^m Q_{C+}(i)T(i)$ $Q_{C+}(i) = Q(i) \text{ si } Q(i) < 0 \text{ y } P(i) > 0$ $Q_{C+}(i) = 0 \text{ en otros casos}$ <p>donde:</p>

			<p>i es el siguiente número de la ventana de medición de 10/12 períodos ,</p> <p>$Q(i)$ representa el valor de la potencia reactiva (Budeanu o IEEE1459) calculada en i^{a} ventana de medición</p> <p>$P(i)$ representa el valor de la potencia activa calculada en i^{a} ventana de medición</p> <p>$T(i)$ representa el tiempo de duración de i^{a} ventana de medición en las horas</p>
Energía aparente	E_s	VAh	$E_s = \sum_{i=1}^m S(i)T(i)$ <p>donde:</p> <p>i es el siguiente número de la ventana de medición de 10/12 períodos</p> <p>$S(i)$ representa el valor de la potencia aparente S calculada en i^{a} ventana de medición</p> <p>$T(i)$ representa el tiempo de duración de i^{a} ventana de medición en las horas</p>

5.2 Red bifásica

Red bifásica			
(los parámetros no mencionados se calculan como para la red monofásica)			
Parámetro			Método de cálculo
Nombre	Símbolo	Unidad	
Potencia activa total	P_{tot}	W	$P_{tot} = P_A + P_B$
Potencia reactiva total definida por Budeanu	Q_{Btot}	var	$Q_{Btot} = Q_{BA} + Q_{BB}$
Potencia reactiva total de componente fundamental	Q_{1tot}	var	$Q_{1tot} = Q_{1A} + Q_{1B}$
Potencia aparente total	S_{tot}	VA	$S_{tot} = S_A + S_B$
Potencia aparente total de distorsión	S_{Ntot}	VA	$S_{Ntot} = S_{NA} + S_{NB}$
Potencia de distorsión total definida por Budeanu	D_{Btot}	var	$D_{Btot} = D_{BA} + D_{BB}$
Factor de potencia total	PF_{tot}	-	$PF_{tot} = \frac{P_{tot}}{S_{tot}}$
Factor total de desplazamiento de fase	$\cos\varphi_{tot}$ DPF_{tot}	-	$\cos\varphi_{tot} = DPF_{tot} = \frac{1}{2}(\cos\varphi_A + \cos\varphi_B)$
Tangente total φ (4 cuadrantes)	$\tan\varphi_{tot(L+)}$	-	$\tan\varphi_{tot(L+)} = \frac{\Delta E_{Q_{tot(L+)}}}{\Delta E_{P_{tot+}}}$ <p>donde: $\Delta E_{Q_{tot(L+)}}$ es el aumento de la energía reactiva total $E_{Q_{tot(L+)}}$ (Budeanu/IEEE-1459) en este periodo de cálculo de la media,</p> <p>$\Delta E_{P_{tot+}}$ es el aumento de la energía activa consumida total $E_{P_{tot+}}$ en este periodo de cálculo de la media</p>
	$\tan\varphi_{tot(C-)}$	-	$\tan\varphi_{tot(C-)} = -\frac{\Delta E_{Q_{tot(C-)}}}{\Delta E_{P_{tot+}}}$ <p>donde: $\Delta E_{Q_{tot(C-)}}$ es el aumento de la energía reactiva total $E_{Q_{tot(C-)}}$ (Budeanu/IEEE-1459) en este periodo de cálculo de la media,</p> <p>$\Delta E_{P_{tot+}}$ es el aumento de la energía activa consumida total $E_{P_{tot+}}$ en este periodo de cálculo de la media</p>
	$\tan\varphi_{tot(L-)}$	-	$\tan\varphi_{tot(L-)} = \frac{\Delta E_{Q_{tot(L-)}}}{\Delta E_{P_{tot+}}}$

			<p>donde: $\Delta E_{Q_{tot}(L-)}$ es el aumento de la energía reactiva total $E_{Q_{tot}(L-)}$ (Budeanu/IEEE-1459) en este período de cálculo de la media,</p> <p>$\Delta E_{P_{tot+}}$ es el aumento de la energía activa consumida total $E_{P_{tot+}}$ en este período de cálculo de la media</p>
	$\tan\phi_{tot(C+)}$	-	$\tan\phi_{tot(C+)} = -\frac{\Delta E_{Q_{tot}(C+)}}{\Delta E_{P_{tot+}}}$ <p>donde: $\Delta E_{Q_{tot}(C+)}$ es el aumento de la energía reactiva total $E_{Q_{tot}(C+)}$ (Budeanu/IEEE-1459) en este período de cálculo de la media,</p> <p>$\Delta E_{P_{tot+}}$ es el aumento de la energía activa consumida total $E_{P_{tot+}}$ en este período de cálculo de la media</p>
Energía activa total (consumida y devuelta)	$E_{P_{tot+}}$ $E_{P_{tot-}}$	Wh	$E_{P_{tot+}} = \sum_{y=1}^m P_{tot+}(i)T(i)$ $P_{tot+}(i) = \begin{cases} P_{tot}(i) & \text{para } P_{tot}(i) > 0 \\ 0 & \text{para } P_{tot}(i) \leq 0 \end{cases}$ $E_{P_{tot-}} = \sum_{y=1}^m P_{tot-}(i)T(i)$ $P_{tot-}(i) = \begin{cases} P_{tot}(i) & \text{para } P_{tot}(i) < 0 \\ 0 & \text{para } P_{tot}(i) \geq 0 \end{cases}$ <p>donde: <i>i</i> es el siguiente número de la ventana de medición de 10/12 períodos, <i>P_{tot}(i)</i> representa el valor de la potencia total activa <i>P_{tot}</i> calculada en <i>ª</i> ventana de medición, <i>T(i)</i> representa el tiempo de duración de <i>ª</i> ventana de medición en las horas</p>
Energía reactiva total (4 cuadrantes)	$E_{Q_{tot}(L+)}$ $E_{Q_{tot}(C-)}$ $E_{Q_{tot}(L-)}$ $E_{Q_{tot}(C+)}$	varh	$E_{Q_{tot}(L+)} = \sum_{y=1}^m Q_{L+}(i)T(i)$ $Q_{L+}(i) = Q(i) \text{ si } Q(i)>0 \text{ y } P(i)>0$ $Q_{L+}(i) = 0 \text{ en otros casos}$ $E_{Q_{tot}(C-)} = \sum_{y=1}^m Q_{C-}(i)T(i)$ $Q_{C-}(i) = Q(i) \text{ si } Q(i)>0 \text{ y } P(i)<0$ $Q_{C-}(i) = 0 \text{ en otros casos}$ $E_{Q_{tot}(L-)} = \sum_{y=1}^m Q_{L-}(i)T(i)$ $Q_{L-}(i) = Q(i) \text{ si } Q(i)<0 \text{ y } P(i)<0$ $Q_{L-}(i) = 0 \text{ en otros casos}$ $E_{Q_{tot}(C+)} = \sum_{y=1}^m Q_{C+}(i)T(i)$ $Q_{C+}(i) = Q(i) \text{ si } Q(i)<0 \text{ y } P(i)>0$ $Q_{C+}(i) = 0 \text{ en otros casos}$ <p>donde: <i>i</i> es el siguiente número de la ventana de medición de 10/12 períodos , <i>Q(i)</i> representa el valor de la potencia reactiva total (Budeanu o IEEE1459) calculada en <i>ª</i> ventana de medición <i>P(i)</i> representa el valor de la potencia activa calculada en <i>ª</i> ventana de medición <i>T(i)</i> representa el tiempo de duración de <i>ª</i> ventana de medición en las horas</p>

Energía aparente total	E_{Stot}	VAh	$E_{Stot} = \sum_{y=1}^m S_{tot}(i)T(i)$ <p>donde: i es el siguiente número de la ventana de medición de 10/12 períodos $S_{tot}(i)$ representa el valor de la potencia aparente total S_{tot} calculada en i^{a} ventana de medición $T(i)$ representa el tiempo de duración de i^{a} ventana de medición en las horas</p>
------------------------	------------	-----	--

5.3 Red trifásica tipo estrella con N

Red trifásica tipo estrella con N (parámetros no mencionados se calculan como para la red monofásica)			
Parámetro			Método de cálculo
Nombre	Símbolo	Unidad	
Potencia activa total	P_{tot}	W	$P_{tot} = P_A + P_B + P_C$
Potencia reactiva total definida por Budeanu	Q_{Btot}	var	$Q_{Btot} = Q_{BA} + Q_{BB} + Q_{BC}$
Potencia reactiva total según IEEE 1459	Q_1^+	var	$Q_1^+ = 3U_1^+ I_1^+ \sin \varphi_1^+$ donde: U_1^+ es componente de secuencia positiva de tensión (de componente fundamental) I_1^+ es componente de secuencia positiva de corriente (de componente fundamental) φ_1^+ es el ángulo entre las componentes U_1^+ y I_1^+
Potencia aparente eficaz	S_e	VA	$S_e = 3U_e I_e$ donde: $U_e = \sqrt{\frac{3(U_A^2 + U_B^2 + U_C^2) + U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2}{18}}$ $I_e = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2}{3}}$
Potencia aparente eficaz de distorsión	S_{eN}	VA	$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 + S_{e1}^2}$ donde: $S_{e1} = 3U_{e1} I_{e1}$ $U_{e1} = \sqrt{\frac{3(U_{A1}^2 + U_{B1}^2 + U_{C1}^2) + U_{AB1}^2 + U_{BC1}^2 + U_{CA1}^2}{18}}$ $I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{A1}^2 + I_{B1}^2 + I_{C1}^2 + I_{N1}^2}{3}}$
Potencia de distorsión total definida por Budeanu	D_{Btot}	var	$D_{Btot} = D_{BA} + D_{BB} + D_{BC}$
Factor de potencia total	PF_{tot}	-	$PF_{tot} = \frac{P_{tot}}{S_e}$
Factor total de desplazamiento de fase	$\cos \varphi_{tot}$ DPF_{tot}	-	$\cos \varphi_{tot} = DPF_{tot} = \frac{1}{3} (\cos \varphi_A + \cos \varphi_B + \cos \varphi_C)$

5 Fórmulas de cálculo

Tangente total φ (4 cuadrantes)	$\tan\varphi_{tot(L+)}$ $\tan\varphi_{tot(C-)}$ $\tan\varphi_{tot(L-)}$ $\tan\varphi_{tot(C+)}$	-	relación como para la red de 2 fases
Energía activa total (consumida y devuelta)	E_{P+tot} E_{P-tot}	Wh	relación como para la red de 2 fases
Energía reactiva total (4 cuadrantes)	$E_{Qtot(L+)}$ $E_{Qtot(C-)}$ $E_{Qtot(L-)}$ $E_{Qtot(C+)}$	varh	relación como para la red de 2 fases
Energía aparente total	E_{Stot}	VAh	$E_{Stot} = \sum_{i=1}^m S_e(i)T(i)$ <p>donde: i es el siguiente número de la ventana de medición de 10/12 períodos $S_e(i)$ representa el valor de la potencia aparente eficaz S_e calculada en y^a ventana de medición $T(i)$ representa el tiempo de duración de \bar{P} ventana de medición en las horas</p>
Valor eficaz de tensión de componente de secuencia cero	U_0	V	$\underline{U}_0 = \frac{1}{3}(\underline{U}_{A1} + \underline{U}_{B1} + \underline{U}_{C1})$ $U_0 = mag(\underline{U}_0)$ <p>donde \underline{U}_{A1}, \underline{U}_{B1}, \underline{U}_{C1} son vectores de las componentes fundamentales de las tensiones de fase U_A, U_B, U_C Operador $mag()$ significa el módulo del vector</p>
Valor eficaz de tensión de componente de secuencia positiva	U_1	V	$\underline{U}_1 = \frac{1}{3}(\underline{U}_{A1} + a\underline{U}_{B1} + a^2\underline{U}_{C1})$ $U_1 = mag(\underline{U}_1)$ <p>donde \underline{U}_{A1}, \underline{U}_{B1}, \underline{U}_{C1} son vectores de las componentes fundamentales de las tensiones de fase U_A, U_B, U_C Operador $mag()$ significa el módulo del vector</p> $a = 1e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j$ $a^2 = 1e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j$
Valor eficaz de tensión de componente de secuencia negativa	U_2	V	$\underline{U}_2 = \frac{1}{3}(\underline{U}_{A1} + a^2\underline{U}_{B1} + a\underline{U}_{C1})$ $U_2 = mag(\underline{U}_2)$ <p>donde \underline{U}_{A1}, \underline{U}_{B1}, \underline{U}_{C1} son vectores de las componentes fundamentales de las tensiones de fase U_A, U_B, U_C Operador $mag()$ significa el módulo del vector</p> $a = 1e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j$ $a^2 = 1e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j$
Factor de desequilibrio de tensión de componente de secuencia cero	u_0	%	$u_0 = \frac{U_0}{U_1} \cdot 100\%$
Factor de desequilibrio de tensión de componente de	u_2	%	$u_2 = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\%$

secuencia negativa			
Componente de secuencia cero de corriente	I_0	A	$I_0 = \frac{1}{3}(I_{A1} + I_{B1} + I_{C1})$ $I_0 = \text{mag}(I_0)$ <p>donde I_{A1}, I_{B1}, I_{C1} son vectores de las componentes fundamentales de las corrientes de fase I_A, I_B, I_C Operador $\text{mag}()$ significa el módulo del vector</p>
Valor eficaz de corriente de componente de secuencia positiva	I_1	A	$I_1 = \frac{1}{3}(I_{A1} + aI_{B1} + a^2I_{C1})$ $I_1 = \text{mag}(I_1)$ <p>donde I_{A1}, I_{B1}, I_{C1} son vectores de las componentes fundamentales de las corrientes I_A, I_B, I_C Operador $\text{mag}()$ significa el módulo del vector</p>
Valor eficaz de corriente de componente de secuencia negativa	I_2	A	$I_2 = \frac{1}{3}(I_{A1} + a^2I_{B1} + aI_{C1})$ $I_2 = \text{mag}(I_2)$ <p>donde I_{A1}, I_{B1}, I_{C1} son vectores de las componentes fundamentales de las tensiones de fase I_A, I_B, I_C Operador $\text{mag}()$ significa el módulo del vector</p>
Factor de desequilibrio de corriente de componente de secuencia cero	i_0	%	$y_0 = \frac{I_0}{I_1} \cdot 100\%$
Factor de desequilibrio de corriente de componente de secuencia negativa	i_2	%	$y_2 = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100\%$

5.4 Red trifásica tipo estrella y triángulo sin N

Red trifásica tipo estrella y triángulo sin N			
(parámetros: tensión y corriente eficaces, componentes constantes de tensiones y corrientes, factores THD y K, componentes simétricas y factores de asimetría, indicadores de parpadeo de luz, se calculan igual que en los circuitos monofásicos; en lugar de las tensiones de fase se utilizan las tensiones entre fases)			
Parámetro			Método de cálculo
Nombre	Símbolo	Unidad	
Tensión entre fases U_{CA}	U_{CA}	V	$U_{CA} = -(U_{AB} + U_{BC})$
Corriente I_2 (sistemas de medición de Aron)	I_2	A	$I_2 = -(I_1 + I_3)$
Potencia activa total	P_{tot}	W	$P_{tot} = \frac{1}{M} \left(\sum_{i=1}^M U_{iAC} I_{iA} + \sum_{i=1}^M U_{iBC} I_{iB} \right)$ <p style="text-align: center;">donde:</p> U_{iAC} es la siguiente muestra de la tensión U_{A-C} U_{iBC} es la siguiente muestra de la tensión U_{B-C} I_{iA} es la siguiente muestra de la corriente I_A I_{iB} es la siguiente muestra de la corriente I_B $M = 2048$ para la red de 50 Hz y 60 Hz
Potencia aparente total	S_e	VA	$S_e = 3U_e I_e$ <p style="text-align: center;">donde:</p> $U_e = \sqrt{\frac{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2}{9}}$ $I_e = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3}}$
Potencia reactiva total (Budeanu e IEEE 1459)	Q_{Btot}	var	$Q = N = \text{sign} \sqrt{S_e^2 - P^2}$ <p>donde <i>sign</i> es igual a 1 o -1. El signo se determina por el ángulo de cambio de fase entre las componentes simétricas normalizadas de tensiones y corrientes compatibles.</p>
Potencia de distorsión total definida por Budeanu	D_{Btot}	var	$D_{Btot} = 0$
Potencia aparente eficaz de distorsión	S_{eN}	VA	$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 + S_{e1}^2}$ <p style="text-align: center;">donde:</p> $S_{e1} = 3U_{e1} I_{e1}$ $U_{e1} = \sqrt{\frac{U_{AB1}^2 + U_{BC1}^2 + U_{CA1}^2}{9}}$ $I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{A1}^2 + I_{B1}^2 + I_{C1}^2}{3}}$
Factor de potencia total	PF_{tot}	-	$PF_{tot} = \frac{P_{tot}}{S_e}$

Energía activa (consumida y devuelta)	$E_{P_{tot+}}$ $E_{P_{tot-}}$	Wh	$E_{p+tot} = \sum_{i=1}^m P_{+tot}(i)T(i)$ $P_{+tot}(i) = \begin{cases} P_{tot}(i) & \text{para } P_{tot}(i) > 0 \\ 0 & \text{para } P_{tot}(i) \leq 0 \end{cases}$ $E_{p-tot} = \sum_{i=1}^m P_{-tot}(i)T(i)$ $P_{-tot}(i) = \begin{cases} P_{tot}(i) & \text{para } P_{tot}(i) < 0 \\ 0 & \text{para } P_{tot}(i) \geq 0 \end{cases}$ <p>donde:</p> <p>i es el siguiente número de la ventana de medición de 10/12 períodos</p> <p>$P_{tot}(i)$ representa el valor de la potencia activa total P_{tot} calculada en y^a ventana de medición</p> <p>$T(i)$ representa el tiempo de duración de \bar{P} ventana de medición en las horas</p>
Energía aparente total	E_{Stot}	VAh	$E_{Stot} = \sum_{i=1}^m S_e(i)T(i)$ <p>donde:</p> <p>i es el siguiente número de la ventana de medición de 10/12 períodos</p> <p>$S_e(i)$ representa el valor de la potencia aparente total S_e calculada en y^a ventana de medición</p> <p>$T(i)$ representa el tiempo de duración de \bar{P} ventana de medición en las horas</p>

5.5 Métodos para promediar los parámetros

Métodos para promediar los parámetros	
Parámetro	Método para promediar
Tensión y corriente eficaz	RMS
Tensión y corriente continua (DC)	media aritmética
Frecuencia	media aritmética
Factor de cresta de U, I	media aritmética
Componentes simétricas de U, I	RMS
Factor de asimetría de U, I	calculado de los valores medios de las componentes simétricas
Potencia activa, reactiva, aparente, distorsiones	media aritmética
Factor de potencia PF	calculado de los valores medios de potencia
$\cos\varphi$	media aritmética
$\tan\varphi$	se calcula como la relación del aumento de la energía reactiva (en el cuadrante apropiado) respecto al aumento de la energía activa consumida
THD U, I	calculado como la relación entre el valor medio RMS de los armónicos altos y el valor medio RMS de componente fundamental (para THD-F), o la relación del valor medio RMS de los armónicos altos al valor medio de la tensión eficaz (para THD-R)
Amplitudes de los armónicos de U, I	RMS
Ángulos entre los armónicos de tensiones y corrientes	media aritmética
Potencia activa y reactiva de armónicos	media aritmética

Notas:

El valor medio RMS se calcula según la fórmula:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2}$$

La media aritmética (AVG) se calcula según la fórmula:

$$AVG = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$$

donde:

- X_i es siguiente valor de parámetro sujeto al cálculo de la media,
- N es el número del valor sujeto al cálculo de la media.

6 Calidad de alimentación - manual

6.1 Información básica

La metodología de medición de la calidad eléctrica en los analizadores se especifica en la norma IEC 61000-4-30. Esta norma, que proporciona algoritmos de medición estrictos, ordenó el mercado de analizadores, y facilita la comparación y la compatibilidad de los resultados de la medición entre los analizadores de diferentes fabricantes. Anteriormente, estos dispositivos usaban diferentes algoritmos, por lo tanto, los resultados de las mediciones de los mismos objetos con dispositivos diferentes a menudo daban resultados completamente diferentes.

Los factores que influyeron en el creciente interés por los temas relacionados con la calidad de alimentación eran, entre otros, la difusión de controladores electrónicos de alimentación, convertidores DC/DC y fuentes conmutadas, bombillas de ahorro de energía, etc., es decir, lo que se refiere a la conversión de la energía eléctrica. Todos estos dispositivos solían distorsionar significativamente la forma de onda de corriente de alimentación.

Las fuentes de alimentación conmutada (comúnmente usadas en aplicaciones domésticas e industriales) a menudo se construyen de tal manera que la tensión alterna de red es rectificadas y suavizada con un condensador, es decir, se cambia en la tensión continua (DC) para convertirse luego con mucha frecuencia y eficiencia en la tensión de salida con el valor deseado. Esta solución, sin embargo, tiene un efecto secundario indeseable. Las recargas de condensadores son mediante pulsos cortos de corriente en momentos cuando la tensión de red está cerca del valor de pico. Del balance de potencia resulta que si la corriente se coge sólo en breves intervalos de tiempo, entonces el valor de pico debe ser mucho más alto que si se toma de forma continua. Una gran relación del valor de cresta de corriente al valor eficaz (llamado factor de cresta) y una disminución en el factor de potencia (en inglés *Power Factor*, *PF*) hacen que para conseguir una potencia activa en el receptor (en vatios), el productor de energía se ve obligado a entregar una potencia más alta que la potencia activa del receptor (esto se llama potencia aparente, expresada en voltios-amperios, VA). El factor pequeño de potencia hace mayor carga de los cables de transmisión y mayores costos de transporte de energía eléctrica. Los componentes armónicos que aparecen en la corriente de alimentación son la causa de problemas adicionales. Como resultado, las empresas de servicios energéticos comenzaron a imponer sanciones económicas a los consumidores que no garantizaban suficientemente alto factor de potencia.

Los destinatarios potenciales interesados en los analizadores de calidad de energía pueden ser por un lado las empresas de servicios energéticos que pueden utilizarlos para controlar a sus clientes, por otro lado, los consumidores de energía, que con el dispositivo pueden detectar y tratar de remediar el bajo factor de potencia y otros problemas relacionados con la calidad de la energía.

Los parámetros de calidad de fuente de alimentación, así como las características energéticas de los receptores se describen con diferentes tamaños e indicadores. Este estudio podría aclarar un poco el tema.

Como se mencionó anteriormente, la falta de estandarización de los métodos de medición causaba unas diferencias significativas en los valores calculados de los diversos parámetros de la red por varios instrumentos. La norma IEC 61000-4-30 creada gracias a esfuerzos de muchos ingenieros fue el primer documento en el que se mencionaban métodos muy precisos, relaciones matemáticas y precisiones necesarias de mediciones para los analizadores de energía eléctrica. El cumplimiento de la norma (y en particular con la clase A) era para garantizar los resultados de mediciones repetitivos y casi idénticos de las mismas magnitudes medidas con dispositivos de diferentes fabricantes.

6.2 Medición de corriente

6.2.1 Pinzas rígidas (CT) para medir las corrientes alternas (AC)

La pinza rígida tipo CT (en inglés *Current Transformer*) es simplemente el transformador que procesa la corriente grande del bobinado primario a la corriente más pequeña en el bobinado secundario. Las mordazas de las típicas pinzas de corriente están hechas de un material ferromagnético (tal como hierro) con el bobinado secundario alrededor de ellas. El bobinado primario es el conductor, que es por lo general una sola bobina, alrededor del cual se sujetan las mordazas de pinza. Si ahora por el conductor examinado fluye la corriente de 1000 amperios, en el bobinado secundario de 1000 bobinas fluirá la corriente de 1 A (si el circuito está cerrado). El resistor se coloca en la misma pinza con la salida de tensión.

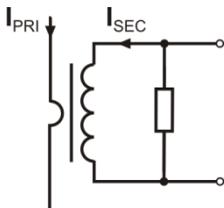


Fig. 16. Pinza rígida CT con salida de tensión

El transformador de corriente de este tipo tiene varias características distintivas. Puede medir corrientes muy altas, al mismo tiempo consume poca energía. La corriente de magnetización causa el desplazamiento de fase (partes décimas de grado), que puede resultar en un error de medición de potencia (especialmente con bajo factor de potencia). La desventaja de este tipo de pinza es también el fenómeno de la saturación del núcleo durante la medición de corrientes muy altas (por encima del rango nominal). La saturación del núcleo debido al fenómeno de histéresis de magnetización causa la aparición de grandes errores de medición que se pueden eliminar sólo por su desmagnetización. Además, cuando la corriente medida tiene un significativo componente de corriente continua (DC), el núcleo

se satura. La gran desventaja de la pinza rígida es también su considerable peso.

A pesar de estos inconvenientes, la pinza CT es actualmente el método no invasivo más ampliamente utilizado para medir las corrientes alternas (AC).

Con el analizador PQM-700 se pueden utilizar las siguientes pinzas CT para medir las corrientes alternas:

- C-4(A), con rango nominal de 1000 A AC,
- C-6(A), con rango nominal de 10 A AC,
- C-7(A), con rango nominal de 100 A AC.

6.2.2 Pinzas para medir las corrientes alternas y continuas (AC/DC)

En algunas situaciones es necesario medir la componente de corriente continua. Para este fin, se deben utilizar las pinzas con un modo diferente de funcionamiento que el transformador de corriente tradicional. Estas pinzas usan el fenómeno físico conocido como el efecto Hall e incluyen en su diseño el sensor Hall. En resumen, este efecto consiste en la aparición de la tensión eléctrica en las paredes del conductor, a través del cual fluye la corriente eléctrica, y, además, se encuentra en el campo magnético con la dirección transversal al vector de inducción de este campo.

Las pinzas de corriente que utilizan este fenómeno pueden medir la componente alterna y constante de corriente. El conductor con corriente colocado dentro de las pinzas crea un campo magnético que se concentra en el núcleo de hierro. En la ranura de núcleo, donde se unen las dos partes de mordazas, se coloca el sensor Hall que consta de semiconductor y su tensión de salida es amplificada por el sistema electrónico alimentado con batería.

En las pinzas de este tipo por lo general tienen una perilla para ajustar el cero de corriente. Para recibir el cero de corriente se deben cerrar las mordazas (sin conductor en el interior) y se ajusta la perilla hasta conseguir el cero de la corriente continua.

Las pinzas de este tipo ofrecidas actualmente por Sonel S.A. son las pinzas C-5A con el rango nominal de 1000 A AC/1400 A DC. Estas pinzas tienen una salida de tensión y para la corriente nominal de 1000 A dan la tensión de 1 V (1 mV/A).

6.2.3 Pinzas flexibles

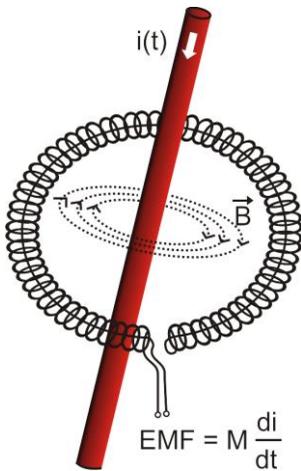


Fig. 17. Bobina de Rogowski

Las pinzas flexibles (en inglés *Flexible Current Probes*) se basan en otra norma física que el transformador de corriente. Su parte más importante es la bobina de Rogowski, llamada así por el físico alemán Walter Rogowski. Esta es una bobina de aire envuelta alrededor del conductor con corriente. La estructura especial de la bobina permite introducir sus dos extremos por un lado, por lo que es posible colocar fácilmente la pinza alrededor del conductor (el extremo de retorno se coloca dentro de la bobina a lo largo de toda su longitud). La corriente que fluye a través del conductor medido crea las líneas de campo magnético que aprovechando el fenómeno de auto-inducción inducen la fuerza electromotriz en los extremos de la bobina. Sin embargo, este voltaje es proporcional a la velocidad de cambio de la corriente en el conductor, y no a la propia corriente.

La bobina de Rogowski tiene algunas ventajas innegables en comparación con los transformadores de corriente. Dado que no tiene el núcleo no se ve afectada por el fenómeno de la saturación, por lo tanto es perfecta para medir grandes corrientes. La bobina también tiene una linealidad excelente y gran banda

de transmisión, mucho más grande que el transformador de corriente, y en comparación con él también pesa menos.

Sin embargo, hasta hace poco, las pinzas flexibles tenían un problema con una expansión más amplia en la medición de la corriente. Hay algunos factores que dificultan la aplicación práctica del sistema de medición con la bobina de Rogowski. Uno de ellos es un nivel bajo de tensión que se induce en los terminales (que depende de las dimensiones geométricas de la bobina). Por ejemplo, la tensión de salida para la frecuencia de 50 Hz de las pinzas flexibles de la serie F (usadas con el analizador PQM-700) es de unos 45 $\mu\text{V/A}$. Estos bajos niveles de voltaje requieren amplificadores de precisión y bajo nivel de ruido, que por supuesto aumentan los costes.

Dado que la tensión de salida es proporcional a la derivada de la corriente, es necesario utilizar el sistema integrador; en general se ofrecen las pinzas flexibles que se componen de la bobina de Rogowski con un sistema analógico de integrador (módulo típico alimentado con la batería). En la salida del integrador hay una señal de tensión proporcional a la corriente medida y con la escala adecuada (p.ej. 1 mV/A).

Otro problema con la bobina de Rogowski es la sensibilidad a los campos magnéticos externos. La bobina ideal debe ser sensible solamente al campo cerrado con el área de la bobina y debe separar completamente de los campos magnéticos externos. Sin embargo, esta es una tarea muy difícil. La única forma de obtener tales propiedades es la construcción muy precisa de la bobina, con el bobinado perfectamente homogéneo y la impedancia más baja. Exactamente la alta precisión del devanado de bobina es responsable del precio relativamente alto de esta pinza.

Junto con el analizador se pueden utilizar las pinzas flexibles ofrecidas por Sonel S.A. Los tipos y los parámetros de la pinza se dan en la **sección 8**.

6.3 Parpadeo de luz (Flicker)

La palabra inglesa *flicker* significa parpadeo. Respecto a las cuestiones relacionadas con la calidad de la energía es un fenómeno del cambio periódico de la intensidad de la luz debido a los cambios de tensión que alimenta las bombillas.

La medición del parpadeo apareció en los analizadores de calidad de energía cuando se descubrió que este fenómeno provoca molestias, irritación, a veces dolores de cabeza, etc. Las vibraciones de intensidad de luz deben tener una frecuencia bastante específica, no pueden ser demasiado lentas porque entonces la pupila humana es capaz de adoptarse a los cambios de la luz, tampoco pueden ser demasiado rápidas porque la inercia del filamento elimina estos cambios casi por completo.

Los estudios han demostrado que la alteración máxima para la frecuencia es de aprox. 9 cambios por segundo. Las fuentes de luz más sensibles resultaron ser las bombilla tradicionales con un filamento de tungsteno. Las lámparas halógenas cuyas fibras tienen una temperatura mucho más alta de las tradicionales también tienen una inercia mucho mayor que reduce los cambios de claridad percibidos por hombre. Las lámparas fluorescentes se caracterizan por la mejor "resistencia" para el parpadeo porque sus propiedades específicas estabilizan la corriente que fluye a través de la lámpara durante los cambios de tensión, y por lo tanto reducen las fluctuaciones de la potencia de iluminación.

El parpadeo se mide según su percepción y se distinguen dos tipos: de período corto P_{ST} (en inglés *short term*), cuyo valor se determina cada 10 minutos, y de período largo P_{LT} (en inglés *long term*), cuyo valor se calcula basándose en los 12 valores siguientes P_{ST} , es decir, cada 2 horas. El tiempo largo de medición resulta directamente del cambio lento del fenómeno, para recoger la muestra de datos fiable, la medición debe ser larga. P_{ST} igual a 1 se considera el que valor está a punto de molestia, por supuesto la sensibilidad al parpadeo varía entre las personas; la adopción de este umbral resulta de las pruebas realizadas en un grupo representativo de personas.

¿Cuál es la razón de la aparición del fenómeno de parpadeo de luz? La causa más frecuente son las caídas de tensión debidas a la conexión y desconexión de grandes cargas y un cierto nivel de parpadeo está presente en la mayoría de redes de alimentación. Además, el efecto adverso en la gente descrito anteriormente no tiene que ser -y por lo general no lo es- síntoma de deficiencias de nuestra instalación. Si en la red se observa una subida repentina e inexplicable del nivel de parpadeo de la luz (es decir, la subida del valor de los factores P_{ST} y P_{LT}) no se debe de ninguna manera ignorarlo. Puede resultar que el parpadeo se deba a las malas conexiones en el sistema, mayores caídas de tensión en las uniones del panel de control (por ejemplo) provocarán mayores fluctuaciones de tensión en los receptores como la bombilla. Las caídas de tensión en las uniones también causan que se calienten, y finalmente, pueden provocar chispas y posiblemente un incendio. Las inspecciones periódicas de la red y los síntomas descritos pueden llamar nuestra atención para encontrar la fuente del peligro.

6.4 Medición de potencia

La potencia es uno de los parámetros más importantes que determina las propiedades energéticas de los circuitos eléctricos. El ajuste de cuentas entre el proveedor y el destinatario es la energía eléctrica equivalente al producto de potencia y tiempo.

En la ingeniería eléctrica hay diferentes variedades de potencia:

- potencia activa (en inglés *Active Power*) representada por la letra P y medida en vatios,
- potencia reactiva (en inglés *Reactive Power*) representada por la letra Q y medida en var,
- potencia aparente (en inglés *Apparent Power*) representada por la letra S y medida en VA.

Los tres tipos de potencia mencionados son los más conocidos, pero esto no significa que la lista termine aquí.

En la escuela se enseña que estas potencias forman los llamados triángulos de potencia, cuyas propiedades expresa la siguiente ecuación:

$$P^2 + Q^2 = S^2$$

Esta ecuación, sin embargo, sólo es válida para los sistemas con las formas de onda sinusoidales de tensiones y corrientes.

Antes de pasar a un análisis más detallado de las cuestiones relacionadas con la medición de potencias, primero se deben definir las potencias particulares.

6.4.1 Potencia activa

La potencia activa P expresa la capacidad del sistema para realizar un trabajo específico. Esta es la potencia más deseada por los consumidores de la energía y por la potencia activa suministrada durante un período se paga al proveedor (por separado se analiza la cuestión del pago por la potencia reactiva adicional, ver más adelante). La potencia activa (y por consiguiente la energía activa) se mide con medidores de la energía eléctrica en todos los hogares.

La fórmula básica para el cálculo de la potencia activa es la siguiente:

$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(t)y(t)dt$$

donde: $u(t)$ - valor instantáneo de tensión, $i(t)$ - valor instantáneo de corriente, T - período para el que se calcula la potencia.

La potencia activa se puede calcular en los sistemas sinusoidales como:

$$P = UI \cos \varphi$$

donde U es el valor eficaz de tensión, I es el valor eficaz de corriente y φ es el ángulo de desplazamiento de fase entre la tensión y la corriente.

La potencia activa se calcula por el analizador PQM-700 directamente a partir de la fórmula integral utilizando los transcurros de muestreo de tensión y corriente:

$$P = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U_i I_i$$

donde M es el número de muestras en la ventana de medición de 10/12 períodos y es igual a 2048, U_i y I_i son siguientes muestras de tensión y corriente.

6.4.2 Potencia reactiva

La fórmula más conocida de *potencia reactiva* también es válida solamente para los circuitos monofásicos con los transcurros sinusoidales de tensión y corriente:

$$Q = UI \sin \varphi$$

La interpretación de la potencia en tales sistemas es la siguiente: es la amplitud de potencia alterna instantánea en los terminales de la fuente. La existencia del valor no-cero de esta potencia confirma el flujo bidireccional de energía y flujo oscilante entre la fuente y el receptor.

Nos podemos imaginar un sistema monofásico con una fuente sinusoidal de tensión, cuya carga es del circuito RC. Dado que, en tales condiciones, los elementos se comportan linealmente, la onda de corriente de fuente será sinusoidal, pero debido a las propiedades del condensador será desplazada respecto a la fuente de tensión. En tal sistema, la potencia reactiva Q es distinta de cero y se puede interpretar como la amplitud de la oscilación de energía, que a su vez es almacenada en un condensador y devuelta a la fuente. La potencia activa del condensador es igual a cero.

Sin embargo, la oscilación de energía parece sólo un efecto presente en casos específicos de los circuitos con el transcurso sinusoidal de tensión y corriente, y no es la causa de la formación de la potencia reactiva. Los estudios realizados en esta área demuestran que la potencia reactiva también aparece en los circuitos donde no hay oscilación de energía. Esta afirmación puede sorprender a muchos ingenieros. En las últimas publicaciones sobre la teoría de potencia como el

único fenómeno físico, que siempre acompaña a la potencia reactiva, se mencionan los desplazamientos de fase entre corriente y tensión.

La fórmula anteriormente mencionada para el cálculo de la potencia reactiva sirve sólo para los circuitos sinusoidales de sólo una fase. Entonces aparece la pregunta: ¿cómo se calcula la potencia reactiva en los sistemas no sinusoidales? Esta pregunta abre la "caja de Pandora" del entorno electro-técnico. Resulta que la definición de la potencia reactiva en los sistemas reales (no sólo los idealizados) es objeto de controversia y ahora (en 2009) no existe una única definición aceptada de la potencia reactiva en los sistemas con transcurros no sinusoidales de tensión y corriente, por no mencionar aquí los circuitos desequilibrados de tres fases. En la norma IEEE (Organización Internacional de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) con el número 1459-2000 (del año 2000) para los circuitos trifásicos no sinusoidales no se encuentra fórmula para la potencia reactiva total, como las tres potencias básicas se mencionan potencia activa, aparente y -atención-inactiva denominada con la letra N. La potencia reactiva se limita sólo al componente fundamental de corriente y tensión y se denomina Q_1 .

Dicha norma es el último documento de este tipo expedido por una organización reconocida que debía ordenar las cuestiones relacionadas con la definición de la potencia. Esto era necesario porque en el entorno científico desde hace muchos años había voces que las definiciones utilizadas hasta entonces podían dar resultados erróneos. Las controversias estaban relacionadas principalmente con la definición de la potencia reactiva y aparente (así como la potencia de distorsión) en los circuitos de una y de tres fases de los transcurros no sinusoidales de tensiones y corrientes.

En 1987, el profesor L. Czarnecki demostró que la definición de Budeanu de la potencia reactiva ampliamente utilizada era errónea aunque la definición hasta hoy se enseña en muchas escuelas técnicas. Esta definición fue presentada por primera vez por el profesor Budeanu en 1927 y tiene la siguiente forma:

$$Q_B = \sum_{n=0}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n$$

donde U_n y I_n son los armónicos de tensión y corriente de orden n , y φ_n el ángulo entre estas dos componentes.

Ya que la introducción de este parámetro significaba que la conocida ecuación del triángulo de potencia no se cumplía para los circuitos con formas de onda no sinusoidales, Budeanu introdujo un nuevo parámetro llamado *potencia de distorsión*:

$$D_B = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q_B^2)}$$

La potencia de distorsión era para representar en el sistema las potencias que aparecían debido a la deformación de las ondas de tensión y corriente.

La potencia reactiva era desde hace años relacionada con las oscilaciones de la energía entre la fuente y la carga. En la fórmula vemos que la potencia reactiva según la definición de Budeanu es la suma de las potencias reactivas de los armónicos particulares. Debido al factor $\sin\varphi$ las componentes pueden ser positivas o negativas dependiendo del ángulo entre la tensión y la corriente del armónico. Por lo tanto, es posible la situación cuando la potencia reactiva total Q_B será cero en caso de armónicos distintos a cero. La observación de que en caso de las componentes distintas a cero, la potencia reactiva total puede ser cero es la clave para un análisis más profundo, que finalmente hizo posible demostrar que Q_B pueden darse en algunos casos unos resultados muy sorprendentes. Los estudios ponen en tela de juicio la creencia general de que existe una relación entre las oscilaciones de energía y la potencia reactiva definida por Budeanu Q_B . Se pueden dar ejemplos de circuitos, donde a pesar de la existencia del carácter oscilatorio del curso de la potencia instantánea, la potencia definida por Budeanu es cero. Durante años, los científicos no eran capaces de relacionar ningún fenómeno físico con la potencia reactiva según esta definición.

Estas dudas sobre la exactitud de la definición de potencia, por supuesto, afectan a la *potencia de distorsión* D_B . Se comenzó a buscar una respuesta a la cuestión si la potencia de distorsión D_B era realmente una medida de deformación en ondas en los circuitos no sinusoidales. La distorsión es una situación en la que la onda de tensión no puede ser "impuesta" a la onda de corriente con dos operaciones: cambiando la amplitud y desplazándola en el tiempo. En otras palabras, si se cumple con la siguiente condición:

$$u(t) = Ai(t - \tau)$$

entonces la tensión no es distorsionada respecto a la corriente. En el caso de la tensión sinusoidal y la carga que es cualquier combinación de los elementos RLC, esta condición se cumple siempre (para la onda sinusoidal, estos elementos mantienen linealidad). Sin embargo, cuando la tensión está distorsionada, la carga RLC no asegura ya la falta de distorsión de corriente respecto a la tensión y ya no es carga lineal, es necesario cumplir con ciertas condiciones adicionales (el módulo que cambia con la frecuencia y la fase de impedancia de la carga).

Por lo tanto, ¿realmente la potencia D_B es una medida de esta deformación? Por desgracia, en este caso la teoría de la potencia según Budeanu también decepciona. Se ha demostrado que la *potencia de distorsión* puede ser igual a cero cuando la tensión se distorsiona respecto a la forma de onda de corriente, y viceversa, la *potencia de distorsión* puede ser distinta a cero en ausencia total de distorsión.

El aspecto práctico de la teoría de potencia respecto a la corrección del factor de potencia en los sistemas con potencia reactiva, debía ser el factor que más gana con las definiciones correctas de potencia reactiva. Fracasaron los intentos de compensación basándose en la potencia reactiva según Budeanu y la potencia de distorsión asociada con ella. Estos conceptos no permitían siquiera el cálculo correcto de la capacidad compensatoria que da el máximo factor de potencia. A veces incluso ocurría que estos intentos terminaban con el empeoramiento adicional de este factor.

Se puede hacer la pregunta: ¿cómo es posible que la teoría de potencia definida por Budeanu se hiciera tan popular? Puede haber varias razones. En primer lugar, es una costumbre de los ingenieros a las antiguas definiciones y los planes de estudios en las escuelas sin cambios desde hace años. Este factor es a menudo subestimado, pero como una excusa se puede recordar que esta teoría durante 60 años no fue anulada. En segundo lugar, en los años 20 del siglo pasado no había dispositivos de medición que mostraran las componentes de armónicos de tensión y corriente, por lo que era difícil verificar las teorías nuevas. En tercer lugar, las formas de onda distorsionadas de tensión y corriente (es decir, con alto contenido de armónicos) es el resultado de una revolución en el sector de la electricidad, que comenzó en la segunda mitad del siglo pasado. Ampliamente se comenzaron a utilizar tiristores, rectificadores controlados, convertidores, etc. Todas estas actividades dieron lugar a muchas distorsiones de la corriente en las redes de alimentación y por lo tanto, el aumento de distorsión armónica. Sólo entonces se empezaron a notar fallos en la teoría de potencia definida por Budeanu. En cuarto lugar, los investigadores relacionados con la industria energética eran conscientes del hecho de que las fábricas invirtieron una fortuna en la infraestructura de medición (contadores de energía). Cualquier cambio en este aspecto podía tener enormes implicaciones financieras.

Sin embargo, los lentos cambios en la conciencia de los ingenieros eléctricos empezaron a ser visibles. A través de los años, con cada vez más comunes cargas no lineales y formas de onda muy distorsionadas, ya no podían ser más toleradas las restricciones de las fórmulas aplicadas.

Un acontecimiento muy importante fue la publicación del año 2000 hecha por IEEE Standard 1459, cuyo nombre es: "Términos para la medición de potencia eléctrica en condiciones sinusoidales, no sinusoidales, equilibradas y desequilibradas". Por primera vez la potencia reactiva definida por Budeanu estaba en el grupo de las definiciones no recomendadas, que no se debía utilizar en los medidores nuevos de la potencia y energía reactiva. También muchas magnitudes se dividieron a estas relacionadas con la componente fundamental de corriente y tensión (primer armónico) y los otros armónicos más altos. En la mayoría de casos, se reconoce que la parte utilizable de la energía se transmite por las componentes de 50/60 Hz, con la participación menor y perjudicial de los armónicos más altos.

El estándar también introdujo un nuevo valor – *potencia inactiva* N , que representa todos las componentes inactivas de la potencia:

$$N = \sqrt{S^2 - P^2}$$

La potencia reactiva es una de las componentes de la potencia inactiva N . En los sistemas monofásicos con las formas de ondas sinusoidales de tensión y corriente, N es igual a Q , por lo que en la potencia desactiva no hay otras componentes inactivas. En los circuitos trifásicos, esta propiedad sólo

tienen las redes sinusoidales simétricas, con el receptor equilibrado puramente resistivo.

Las otras componentes de potencia inactiva están relacionadas con los fenómenos físicos concretos. De acuerdo con una de las teorías de profesor Czarnecki que de mejor manera explica los fenómenos físicos en los circuitos trifásicos, la ecuación de potencia en tales sistemas se puede escribir de la siguiente forma:

$$S^2 = P^2 + D_s^2 + Q^2 + D_u^2$$

D_s es el efecto de dispersión que se produce en el sistema, como resultado de los cambios en la conductancia del receptor junto con el cambio de la frecuencia. Por lo tanto, la presencia de los elementos reactivos en el receptor puede dar lugar a la potencia dispersada.

La potencia reactiva Q en esta ecuación se produce con el desplazamiento de fase entre los armónicos de tensión y corriente.

D_u es la potencia desequilibrada que es una medida de desequilibrio del receptor trifásico. Esta componente explica la situación en la que el receptor desequilibrado trifásico puramente resistivo resulta en un factor de potencia menor que la unidad. Este receptor no tiene la potencia reactiva Q , sin embargo, del triángulo de potencia S , P , Q resulta algo completamente diferente (la teoría de la potencia según Budeanu con la potencia de distorsión tampoco puede explicar esta situación, en el receptor puramente resistivo la potencia de distorsión D_B es igual a cero).

El intento de unir el estándar IEEE 1459-2000 con la teoría de la potencia de Czarnecki lleva a la conclusión de que la potencia inactiva esconde en sí por lo menos tres fenómenos físicos independientes que afectan a la reducción de la eficiencia de la transferencia de energía desde la fuente hasta el receptor, lo que reduce el factor de potencia:

$$PF = \frac{P}{S_e} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + D_s^2 + Q^2 + D_u^2}}$$

La potencia reactiva conocida como la letra Q en el estándar IEEE 1459-2000 se limita a la componente fundamental y se aplica tanto a los sistemas monofásicos como trifásicos.

En los sistemas monofásicos:

$$Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1$$

En los sistemas trifásicos se tiene en cuenta sólo la componente de secuencia positiva a esta potencia:

$$Q_1^+ = 3U_1^+ I_1^+ \sin \varphi_1^+$$

Para que la potencia se mida correctamente se requiere la secuencia positiva de rotación de fases (es decir, fase L2 retrasada 120° respecto a L1, fase L3 retrasada 240° respecto a L1).

El concepto de la secuencia positiva se comentará más detalladamente al describir el equilibrio.

El valor de potencia reactiva de la componente fundamental es la magnitud principal para estimar el tamaño del condensador que mejora el factor DPF, es decir, el desplazamiento de la componente fundamental de la tensión respecto a la misma componente de la corriente (es decir, el compensador de la potencia reactiva del armónico fundamental).

6.4.3 Potencia reactiva y los sistemas de 3 conductores

La medición correcta de la potencia reactiva no es posible en los receptores desequilibrados conectados por 3 conductores (sistemas tipo triángulo y estrella sin N). Esta afirmación puede sorprender a muchos.

El receptor puede ser tratado como la "caja negra" con sólo tres terminales disponibles. No somos capaces de determinar la estructura interna de este receptor. Para calcular la potencia reactiva es necesario conocer el ángulo de desplazamiento de fase entre la tensión y la corriente en cada rama del receptor. Por desgracia, no conocemos este ángulo. En el sistema del receptor tipo "triángulo" conocemos las tensiones en las impedancias particulares pero no conocemos la corriente; en tales sistemas se miden las tensiones entre las fases y las corrientes lineales. Cada corriente lineal es la suma de las dos corrientes de fase. En los receptores tipo estrella sin N sabemos las corrientes que fluyen a través de la impedancia, pero no sabemos las tensiones (cada una de las tensiones entre fases es la suma de dos

tensiones de fase).

Hay que darse cuenta que con estas tensiones en terminales y con las corrientes que entran en esta "caja negra" hay un número infinito de variaciones de la estructura interna del receptor, que nos darán los mismos resultados de las mediciones de corrientes y tensiones visibles por fuera de esta caja negra.

¿Cómo es posible que existen los medidores de potencia reactiva están diseñados para medir en las redes de tres conductores, y los analizadores de red que en estas condiciones permiten medir la energía reactiva?

En ambos casos, los fabricantes recurren al truco, que se basa en la creación artificial del punto de referencia (terminal neutro N virtual). Este punto se puede crear fácilmente conectando a los terminales de nuestra "caja negra" el sistema de tres resistencias del mismo valor y unidas en forma de estrella. El potencial del punto central del sistema de resistencias se utiliza para calcular las "tensiones de fase". Obviamente se necesitan aquí las comillas porque este cero virtual permitirá los resultados bastante correctos sólo cuando el desequilibrio del receptor sea mínimo. En todos los demás casos, la indicación de la potencia reactiva de este dispositivo debe ser tratada con mucha desconfianza.

El instrumento de medición en ningún caso debe conducir al usuario al error, este tipo de aproximación puede ser permitida solamente con la reserva expresa de que el valor mostrado no es el resultado de la medición real, sino sólo una aproximación.

6.4.4 Potencia reactiva y contadores de energía reactiva

El contador de energía reactiva es un dispositivo desconocido para los usuarios particulares, sólo el contador de energía activa que mide en Wh o kWh es comúnmente utilizado para hacer el ajuste de cuentas con el proveedor de energía. Los usuarios domésticos se encuentran en una posición cómoda, pagan sólo por la energía útil y no tienen que preguntarse cuál es el factor de potencia en su instalación.

Los destinatarios industriales, en cambio al primer grupo, están obligados por los contratos y a veces bajo amenaza de sanciones económicas, mantener el factor de potencia en el nivel adecuado.

La norma EN 50160 menciona requisitos relativos a la calidad de la energía y determina los parámetros de calidad que debe cumplir el proveedor de energía. Entre estos parámetros son, entre otros, la frecuencia de red, la tensión RMS, la distorsión armónica total (THD) y los niveles permitidos de tensión de armónicos individuales. Además de los requisitos en la norma EN 50160 a menudo aparece una condición adicional: el proveedor no tiene que cumplir estos requisitos, si el consumidor de energía no proporciona el factor $\tan\phi$ por debajo de un cierto umbral (el valor acordado que puede ser cambiado en el acuerdo entre la energía del proveedor y del consumidor, por ejemplo 0,4) y/o excede el nivel acordado de la energía activa consumida.

El factor $\tan\phi$ se lo define como la relación de la potencia reactiva calculada a la energía activa en un período determinado. Si volvemos por un momento al triángulo de potencia en los sistemas sinusoidales vemos que la tangente del ángulo de desplazamiento de fase entre la corriente y la tensión es igual a la relación de la potencia reactiva Q y la potencia activa P. Por lo tanto, el criterio de mantener $\tan\phi$ por debajo de 0,4 es nada más que la constatación de que el nivel máximo calculado de la potencia reactiva no puede ser mayor a 0,4 del valor calculado de la energía activa. Cada consumo de potencia reactiva por encima de este nivel está sujeto a un pago adicional.

¿El conocimiento del factor $\tan\phi$ calculado de esta forma da a ambas partes interesadas una imagen real de la eficacia de transmisión de energía? ¿No se ha mencionado anteriormente que la potencia reactiva es sólo uno de los componentes de la potencia inactiva que afectan a la reducción del factor de potencia?

De hecho, parece que en lugar de $\tan\phi$ se debería usar el factor de potencia PF, que también tiene en cuenta los otros factores.

La legislación actual, por desgracia, no da ninguna otra opción, por lo que la medición correcta de la energía reactiva parece ser una cuestión clave. Ahora se debe plantear la cuestión: ¿los contadores de energía proporcionan las lecturas correctas si se toman en cuentas las controversias descritas anteriormente para definir la potencia reactiva? ¿Qué miden realmente los contadores de la potencia reactiva usados comúnmente?

Las respuestas a estas preguntas se puede tratar de encontrar en la norma sobre estos contadores IEC 62053-23. Por desgracia, a nuestra decepción, no encontramos en ella ninguna referencia a medidas en las condiciones no sinusoidales, las fórmulas de cálculo se refieren a las situaciones sinusoidales (en la norma leemos que por razones "prácticas" se refiere sólo a las ondas sinusoidales). La norma no menciona ningún criterio de examen que permita estudiar las propiedades del contador con ondas distorsionadas de tensiones y corrientes. También puede ser sorprendente que la norma más antigua IEC 61268 (ya retirada) definía la prueba para examinar la precisión de la medición en el 10% del tercer armónico de corriente.

La situación actual permite a los diseñadores de contadores la elección del método de medición, que, desgraciadamente, conduce a diferencias significativas en la lectura de la energía reactiva en la presencia de altos niveles de distorsión armónica.

Los contadores más antiguos, es decir electromecánicos, tienen la característica similar al filtro de paso bajo, los armónicos más altos son atenuados en él por lo que la medición de la potencia reactiva en presencia de armónicos es muy cercana al valor de la potencia reactiva de la componente fundamental.

Los contadores electrónicos cada vez más comunes pueden realizar mediciones con métodos diferentes. Por ejemplo, se puede medir la potencia activa y la potencia aparente, y la potencia reactiva se calcula del triángulo de potencia (raíz cuadrada de la suma de cuadrados de las dos potencias). De hecho, según el estándar IEEE 1459-2000, estos contadores miden la potencia inactiva en lugar de la potencia reactiva. Otro fabricante puede utilizar el método de desplazamiento de onda de tensión de 90° , lo que da un resultado similar a la potencia reactiva de la componente fundamental.

Cuanto mayor contenido de armónicos, tanto mayor será la diferencia en las lecturas, y, por supuesto, como consecuencia habrá otros pagos por la energía calculada.

Como se ha indicado anteriormente, la medición de la potencia reactiva en sistemas desequilibrados de tres conductos mediante los contadores tradicionales está sujeta a un error adicional debido al cero virtual en el interior del contador que tiene poco en común con el cero real del receptor.

Además, los fabricantes generalmente no proporcionan ninguna información sobre el método de medición aplicado.

Sólo se puede esperar con impaciencia a la siguiente versión de la norma, que -esperemos- defina un método de medición mucho más preciso, así como el modo de prueba en las condiciones no sinusoidales.

6.4.5 Contadores de energía reactiva de 4 cuadrantes

Se utiliza en muchas situaciones la división de la energía reactiva en cuatro componentes separados, cada uno de los cuales se cuenta por separado. La división en cuadrantes se basa en los signos de potencia activa y reactiva, como se muestra en la Fig. 18.

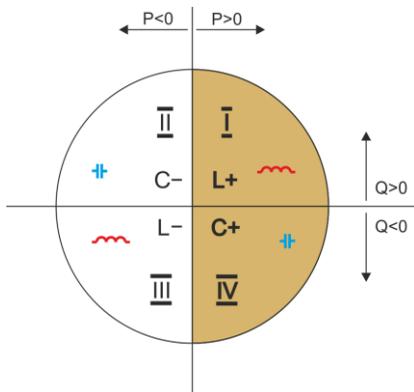


Fig. 18. La división del flujo de potencia y energía de cuatro cuadrantes.

- el cuadrante I (marcado "L+"): la potencia activa es positiva (consumo de energía activa), la potencia reactiva es positiva (consumo de potencia reactiva). En tales condiciones, la naturaleza de la carga es inductiva.
- el cuadrante II (marcado "C-"): la potencia activa es negativa (devolución de energía activa), la potencia reactiva es positiva (consumo de potencia reactiva). La naturaleza de la carga es capacitiva.
- el cuadrante III (marcado "L-"): la potencia activa es negativa (devolución de energía activa), la potencia reactiva es negativa (devolución de potencia reactiva). En tales condiciones, la naturaleza de la carga es inductiva.

- el cuadrante IV (marcado "C+"): la potencia activa es positiva (consumo de energía activa), la potencia reactiva es negativa (devolución de potencia reactiva). La naturaleza de la carga es capacitiva.

Los signos más y menos en los cuadrantes muestran el signo de la potencia activa.

Esta división permite construir contadores de energía reactiva que aumentan su estado sólo cuando el flujo de energía se lleva a cabo en el cuadrante dado. Esto también significa que en el momento dado sólo uno de los contadores puede aumentar su estado.

En un caso típico de proporcionar la energía al receptor, el trabajo se celebra en dos cuadrantes: I (L+) y IV (C+). En estos dos cuadrantes también se monitoriza el tangente φ (en condiciones polacas) para los receptores conectados a la red de tensión media y alta. Los coeficientes de cuatro cuadrantes $\tan\varphi$ se determinan sobre la base del consumo registrado de las energías correspondientes:

$$\tan\varphi_{(L+)} = \frac{\Delta E_{Q(L+)}}{\Delta E_{P+}}$$

$$\tan\varphi_{(C+)} = \frac{\Delta E_{Q(C+)}}{\Delta E_{P+}}$$

Si se utiliza la convención de que todos los contadores de energía tienen el signo positivo, los valores calculados de las tangentes se complementan con el signo que resulta de los signos de potencia activa y reactiva en el cuadrante dado. Por lo tanto, el signo $\tan\varphi_{(L+)}$ es siempre positivo y, en caso $\tan\varphi_{(C+)}$ es siempre negativo.

Los valores calculados de las tangentes pueden ser la base para calcular las sanciones por consumo de energía reactiva por encima de esta norma. En caso del cuadrante I (L+), el límite típico por encima del cual se pagan sanciones es 0,4. En caso del cuadrante IV (C+) a menudo cualquier consumo de potencia reactiva es la base para el cálculo de las sanciones. Por esta razón, lo más rentable (desde el punto de vista del receptor) es trabajar en el primer cuadrante (L+) en el rango $\tan\varphi_{(L+)}$ entre 0 y 0,4.

6.4.6 Potencia aparente

La potencia aparente S se expresa como el producto del valor eficaz de la tensión y corriente:

$$S = UI$$

Como la potencia aparente no tiene la interpretación física, sin embargo, se utiliza en el diseño de los equipos de transmisión. Su valor es igual a la potencia activa máxima que puede ser suministrada para la carga con estos valores eficaces de tensión y corriente. Por lo tanto, la potencia aparente determina la capacidad máxima de la fuente para proporcionar la energía útil al receptor.

La medida de eficiencia de la potencia suministrada por el receptor es el factor de potencia, que es la relación de la potencia activa a la potencia aparente.

En los sistemas sinusoidales:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{UI \cos\varphi}{UI} = \cos\varphi$$

En los sistemas no sinusoidales tal simplificación no es aceptable y el factor de potencia se calcula basándose en la relación real de la potencia activa y aparente:

$$PF = \frac{P}{S}$$

En las redes de una sola fase la potencia aparente se calcula como se muestra en la fórmula anterior y no hay aquí más sorpresas. Resulta, sin embargo, que en los sistemas trifásicos el cálculo de esta potencia es igualmente difícil como en caso de la potencia reactiva. Por supuesto, esto se aplica a las redes reales de formas de onda no sinusoidales, que también pueden ser desequilibradas.

Los estudios han demostrado que el uso de esta fórmula puede dar resultados erróneos si la red no está equilibrada. Dado que la potencia aparente no tiene una interpretación física, resulta difícil determinar cuál de las definiciones propuestas de la potencia aparente es la más adecuada. Sin embargo, se han intentado definir la potencia aparente basándose en la observación de que esta potencia está estrechamente relacionada con las pérdidas de transmisión y el factor de potencia. Conociendo las pérdidas de transmisión y el factor de potencia se puede determinar indirectamente la definición correcta de la potencia aparente.

Las definiciones utilizadas hasta ahora son, entre otras, la potencia aparente aritmética y geométrica. Los estudios realizados han demostrado, que la definición aritmética ni geométrica dan el valor correcto del factor de potencia. La única definición fiable propuso en 1922 el físico alemán F. Buchholz:

$$S_e = 3U_e I_e$$

Se basa en los valores efectivos de tensión y corriente, y la misma potencia se llama la potencia aparente efectiva (por esta razón para los sistemas trifásicos se añade el signo "e"). Estos valores efectivos de tensión y corriente son los valores teóricos que representan las tensiones y las corrientes en un sistema trifásico de energía equilibrada equivalente. La cuestión clave es determinar U_e e I_e .

La norma IEEE 1459 menciona las siguientes fórmulas. En las redes de tres conductores:

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}}$$

$$U_e = \sqrt{\frac{U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2}{9}}$$

En las redes de cuatro conductores:

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2}{3}}$$

$$U_e = \sqrt{\frac{3(U_a^2 + U_b^2 + U_c^2) + U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2}{18}}$$

donde I_a , I_b , I_c son los valores eficaces de corrientes (lineares o fásicas) de las fases particulares, I_n es el valor eficaz de la corriente del conductor neutro, U_a , U_b , U_c son los valores eficaces de las tensiones fásicas, U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} son los valores eficaces de las tensiones entre fases.

El valor contado de esta forma S_e tiene en cuenta tanto la pérdida de potencia en el conductor neutro (en las redes de cuatro conductores), así como el impacto del desequilibrio.

6.4.7 Potencias de distorsión D_B y la potencia eficaz aparente de la distorsión S_{eN}

Durante el examen de la potencia reactiva se ha demostrado que la potencia de distorsión definida por Budeanu no se puede utilizar en caso de grandes distorsiones de tensiones y corrientes y la asimetría de los sistemas de tres fases (paradoja de la potencia de distorsión que no es una medida de la distorsión real). Sin embargo, esta potencia es usada a menudo por los profesionales que se dedican al análisis de la calidad de la energía y los fabricantes de sistemas de compensación de la potencia reactiva.

Debe quedar claro que basarse en este parámetro daba relativamente buenos resultados sólo en las condiciones de ligeras distorsiones de formas de onda y poca asimetría.

El estándar IEEE 1459-2000 menciona que esta definición de potencia, igual que en caso de la potencia reactiva definida por Budeanu, está cargada con un fallo indeleble y se recomienda su retirada completa del uso.

En lugar de la potencia D_B se propone la potencia aparente de distorsión S_{eN} que caracteriza mejor la potencia total de distorsión en el sistema. La potencia S_{eN} permite evaluar rápidamente si la carga se utiliza en la distorsión armónica pequeña o grande, es también la base para la estimación de los filtros estáticos o activos y los compensadores.

De acuerdo con la definición (para sistemas trifásicos):

$$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 - S_{e1}^2}$$

donde:

$$S_{e1} = 3I_{e1}U_{e1}$$

La tensión y la corriente eficaces de la componente fundamental (respectivamente I_{e1} y U_{e1}) se calcula como I_e y U_e excepto que en lugar de los valores eficaces de las tensiones de fase o entre fases y los valores eficaces de las corrientes lineales se sustituyen los valores eficaces de sus componentes fundamentales.

En los sistemas de una sola fase para el cálculo de la potencia aparente de distorsión se puede utilizar la fórmula más sencilla:

$$S_N = \sqrt{S^2 - (U_1 I_1)^2}$$

donde U_1 y I_1 son los valores eficaces de las componentes fundamentales de la tensión de fase y de la corriente.

6.4.8 Factor de potencia

El factor de potencia real, es decir, que tiene en cuenta la presencia de armónicos más altos se llama simplemente el factor de potencia (en inglés *True Power Factor*, *TPF* o *PF*). Para los circuitos sinusoidales se equipara con el llamado factor de potencia de desplazamiento de fase, que es popular $\cos\varphi$ (en inglés *Displacement Power Factor*, *DPF*).

Por lo tanto, el DPF es una medida de desplazamiento de fase entre las componentes fundamentales de tensión y corriente:

$$DPF = \frac{P_1}{S_1} = \frac{U_1 I_1 \cos\varphi_{U1I1}}{U_1 I_1} = \cos\varphi_{U1I1}$$

$$PF = \frac{P}{S}$$

En el caso de una carga puramente resistiva (en red monofásica), la potencia aparente es igual al valor de la potencia activa y la potencia reactiva es igual a cero, por lo que la carga aprovecha completamente el potencial energético de la fuente y el factor de potencia es 1. La aparición de la componente reactiva inevitablemente conduce a una disminución en la eficiencia de transmisión de energía, la potencia activa es entonces más pequeña que la potencia aparente y la potencia

reactiva aumenta.

En los sistemas trifásicos, la reducción del factor de potencia también afecta el desequilibrio del receptor (ver la discusión sobre la potencia reactiva). En estos sistemas, el valor correcto del factor de potencia se obtiene utilizando la potencia eficaz aparente S_e , que se define en el estándar IEEE 1459-2000.

6.5 Armónicos

La división de los ciclos periódicos en las componentes armónicas es una operación matemática muy popular basada en la teoría de Fourier, que dice que cada ciclo periódico puede ser representado como la suma de las componentes sinusoidales con frecuencias que son los múltiplos totales de la frecuencia fundamental de tal ciclo. El período puede ser sometido a la transformada rápida de Fourier (FFT), que como resultado da las amplitudes y las fases de las componentes armónicas en el sector de la frecuencia.

En una situación ideal, se genera tensión en el generador que proporciona en su salida la forma de onda sinusoidal pura 50/60 Hz (sin armónicos más altos). Si el receptor es un sistema lineal, entonces también la corriente en tal situación ideal es un curso sinusoidal puro. En los sistemas reales, tanto las ondas de tensión como de corriente se distorsionan, por lo que deben contener, aparte de la componente fundamental, también los armónicos más altos.

¿Por qué la presencia de armónicos más altos en la red no es deseable?

Una de las razones es el efecto, que consiste en empujar los electrones desde el centro del conductor hacia fuera junto con el aumento de la frecuencia de corriente. Como resultado, cuanto mayor es la frecuencia tanto menor sección transversal del conductor tienen los electrones a disposición lo que es equivalente al aumento de la resistencia. En efecto de este fenómeno, cuanto más alto el orden del armónico de corriente, tanto mayor resistencia efectiva del cableado para este armónico, lo que a su vez conduce inevitablemente a mayores pérdidas de potencia y el calentamiento de los cables.

Un ejemplo clásico de este efecto se refiere al conductor neutro en las redes trifásicas. En la red con pocas distorsiones con un desequilibrio pequeño y un receptor simétrico (o poca asimetría), la corriente en el conductor neutro tiende a ponerse a cero (la corriente es bastante más pequeña que los valores de las corrientes de fase eficaces). Esta observación ha tentado a muchos diseñadores a los ahorros mediante la instalación en tales sistemas del cableado con neutro con una sección transversal más pequeña que los conductores de fase. Todo funcionaba muy bien hasta que en la red aparecieron los armónicos de los ordenes impares que eran múltiplos de 3 (tercero, noveno, etc). De repente el conductor neutro empezaba a recalentarse y la medición de la corriente mostraba su muy alto valor eficaz. La explicación de este fenómeno es bastante simple. El diseñador no tuvo en cuenta en el ejemplo anterior dos circunstancias: en las redes con formas de onda distorsionadas, los armónicos más altos pueden no ponerse a cero en el conductor neutral, en cambio, pueden sumarse, y, en segundo lugar el efecto de empujar los electrones desde el centro del conductor hacia fuera y los valores altos de las corrientes armónicas aumentaban aún más su calentamiento.

Vamos a tratar de responder a dos preguntas básicas:

¿Por qué aparecen las componentes armónicas en la tensión?

¿Por qué aparecen las componentes armónicas en la corriente?

Al parecer, estas dos preguntas son casi idénticas, pero es muy importante tratar por separado la tensión y la corriente.

La respuesta a la primera pregunta es: los armónicos de tensión son el resultado de impedancia de la red de distribución distinta a cero entre el generador (que genera una senoide pura) y el receptor.

Sin embargo, los armónicos de corriente son el resultado de la impedancia no lineal del receptor. Por supuesto, hay que señalar que el receptor lineal alimentado con la tensión distorsionada se distorsiona como la onda de corriente.

En la literatura a menudo se afirma que "el receptor genera los armónicos". Hay que tener en cuenta que en este caso el receptor no es la fuente física de energía (como sugiere la palabra "genera"). La única fuente de energía es el sistema de distribución. Si el receptor es un dispositivo

pasivo, la energía transferida del receptor al sistema de distribución viene del mismo sistema de distribución. Estamos tratando con el flujo bidireccional negativo e inútil de energía. Como ya se discutió con ocasión del factor de potencia, este fenómeno conduce a la pérdida innecesaria de energía, y la corriente "generada" en el receptor provoca una carga adicional en el sistema de distribución.

Vamos a analizar el siguiente ejemplo. El típico receptor no lineal, como la fuente conmutada de uso común (p.ej. de ordenador), recibe energía del generador de tensión sinusoidal ideal. Por ahora, vamos a suponer que la impedancia de conexiones entre el generador y el receptor es cero. La tensión medida en los terminales del receptor tiene una onda sinusoidal (no hay armónicos más altos), esta es simplemente la tensión del generador. Sin embargo, la onda de la corriente del receptor incluirá las componentes armónicas, el receptor no lineal a menudo consume la corriente sólo en ciertos momentos de toda la sinusoide (p.ej. la corriente máxima puede tener lugar cerca del pico de la sinusoide de tensión).

Sin embargo, el receptor no genera los armónicos de corriente, sólo consume la corriente de forma alterna o no continua. Toda la energía es suministrada sólo por el generador. En el siguiente paso se puede modificar el circuito introduciendo entre el generador y el receptor la impedancia, que representa la resistencia de cables, bobinas de transformadores, etc.

Las mediciones de los armónicos de tensión y corriente de receptor darán resultados ligeramente diferentes. ¿Qué va a cambiar? Habrá unos pequeños armónicos de tensión y también algunos cambios en el espectro de frecuencia de corriente.

Cuando se analiza la onda de tensión, en el receptor se puede notar que la onda sinusoidal original se distorsionó un poco. Si el receptor cogía la corriente principalmente en momentos de cresta de tensión, entonces tendrá los picos planos. El alto consumo de corriente en estos momentos de tensión resulta en una mayor disminución de la impedancia de red. Parte de una onda sinusoidal perfecta se centra ahora en esta impedancia. Hay un cambio en el espectro de corriente debido a la onda de tensión ligeramente diferente que suministra el receptor.

Este ejemplo y "los picos planos" de la sinusoide de tensión es una imagen muy frecuente en las redes típicas a las que se conectan comúnmente las fuentes de alimentación en modo conmutado.

6.5.1 Característica de los armónicos en sistemas trifásicos

Los armónicos del orden especificado en los sistemas trifásicos tienen una característica especial, que se presenta a continuación en la tabla:

Orden	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Frecuencia [Hz]	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Secuencia (+ positiva, - negativa, 0 cero)	+	-	0	+	-	0	+	-	0

La fila "Secuencia" se refiere al método de componentes simétricas, que permite la distribución de cualquiera de los tres vectores en los tres conjuntos de vectores: en la secuencia positiva, negativa y cero (más información en la sección dedicada al desequilibrio).

Presentamos un ejemplo. Supongamos que el motor trifásico suministrado de una red equilibrada de cuatro conductores (es decir, las tensiones eficaces de fase son iguales, y los ángulos entre las componentes fundamentales son de 120°).

El signo "+" en la fila de la secuencia para el primer armónico indica la dirección normal de rotación del eje de motor. Los armónicos de tensión, para los que el signo también es un "+", crean el par rotativo acorde a la dirección de la componente fundamental. Los armónicos de las filas 2, 5, 8, 11 son los armónicos de la secuencia negativa, es decir, crean el par rotativo que contrarresta la dirección normal de rotación del motor, lo que puede provocar la acumulación de calor, el desperdicio de energía y la pérdida de productividad. El último grupo son los armónicos de la secuencia cero, tal como el armónico tercero, sexto y noveno, que no generan ningún par rotativo pero fluyendo a través del devanado de motor causan un calentamiento adicional.

A base en estos datos de la tabla se puede observar que la secuencia +, -, 0 se repite para

todas las filas sucesivas de los armónicos. La fórmula que une el tipo de secuencia con el orden es muy simple y para k que es un número entero:

Secuencia	Orden del armónico de secuencia
positiva "+"	$3k + 1$
negativa "-"	$3k - 1$
cero "0"	$3k$

Los armónicos de ordenes pares no aparecen cuando el transcurso es simétrico respecto a la línea de su valor medio, y esta propiedad tienen los transcurros en la mayoría de los sistemas de alimentación. En una situación típica, los niveles medidos de armónicos de ordenes pares tienen el valor mínimo. Si tenemos en cuenta esta propiedad, resulta que el grupo de armónicos con las características menos deseables es el tercero, noveno, décimo, decimoquinto (secuencia cero) y el quinto, undécimo, decimoséptimo (secuencia negativa).

Los armónicos de corriente que son los múltiplos del número 3 causan unos problemas adicionales en algunos sistemas. En los sistemas de 4 conductores tienen propiedades muy indeseables cuando se suman en el conductor neutro. Resulta que a diferencia de armónicos de otros ordenes, la suma de los valores instantáneos de las corrientes de fase es cero, las ondas de estos armónicos son en fase conforme entre sí, lo que resulta en la adición de las corrientes de fase de este armónico en el conductor neutro. Esto podría sobrecalentar el cable (sobre todo en los sistemas de distribución, con una sección más pequeña de este conductor que los conductores de fase, y hasta hace poco esto era una práctica común). Por lo tanto, en redes con cargas no lineales y grandes distorsiones de corriente actualmente se recomienda que la sección del cable neutro sea más grande que de los conductores de fase.

En los sistemas tipo triángulo, los armónicos de estos ordenes no están presentes en las corrientes lineales (excepto en los sistemas equilibrados), pero circulan en las ramas de la carga causando innecesariamente la pérdida de energía.

El carácter de los armónicos particulares como se muestra en la tabla mantiene su precisión total sólo en los sistemas trifásicos equilibrados. Sólo en tales sistemas, el armónico fundamental tiene sólo el carácter de secuencia compatible. En los sistemas reales en los que existe un cierto grado de asimetría de tensión de alimentación y el desequilibrio de carga, hay componentes de secuencia negativa y cero. La medida de este desequilibrio son los factores de asimetría. Precisamente a causa de esta asimetría de la componente fundamental, y también las diferencias en las amplitudes y fases de los armónicos altos en cada fase, también estos armónicos tendrán la secuencia positiva, negativa y cero. Cuanto mayor es el desequilibrio, tanto mayor es el contenido de las otras componentes armónicas.

6.5.2 Factor THD

El factor de distorsión armónica THD (en inglés *Total Harmonic Distortion*) es el indicador más común de distorsión de ondas. En la práctica, se usan dos tipos de este factor:

- THD_F (THD-F o simplemente THD) – factor de distorsión armónica respecto a la componente fundamental de onda (en inglés *fundamental*),
- THD_R (THD-R) – factor de distorsión armónica respecto al valor eficaz (RMS) de onda.

En ambos casos, el THD se expresa como un porcentaje. Aquí están las definiciones:

$$THD_F = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n A_h^2}}{A_1} \times 100\%$$

$$THD_R = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n A_h^2}}{A_{RMS}} \times 100\%$$

donde: A_n – valor eficaz del armónico de orden h,
 A_1 – valor eficaz de componente fundamental,
 A_{RMS} – valor eficaz de onda.

Limitar el número de armónicos durante el cálculo de THD se debe principalmente a las limitaciones del equipo de medición. Dado que el analizador PQM-700 permite medir los armónicos hasta el 40° orden, el cálculo de THD incluye los armónicos hasta el 40° orden.

Hay que recordar que estas dos definiciones darán los valores significativamente diferentes en caso de las ondas muy distorsionadas. THD_R no puede exceder el valor del 100%, en cambio THD_F no tiene tal límite y puede tener el valor del 200% o más alto. Este caso se puede ver en la medición de corriente muy distorsionada. La distorsión armónica de tensión normalmente no excede un pequeño porcentaje (tanto THD_F como THD_R); por ejemplo la norma EN 50160 establece el límite del 8% (THD_F).

6.5.3 Distorsión en demanda TDD

El factor de distorsión de demanda TDD (en inglés *Total Demand Distortion*) es un indicador que representa el nivel del valor eficaz de las corrientes armónicas más altas respecto a la corriente máxima demandada (en inglés *Demand Current*). Procede del factor THD y su valor se expresa por la fórmula:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_L} \times 100\%$$

donde: I_h – valor eficaz del armónico de orden h ,
 I_L – corriente demandada.

Comparando la fórmula anterior con la fórmula para las corrientes de THD se puede ver que se diferencian sólo por el valor del denominador. El contador se mantiene sin cambios y representa el valor eficaz de armónicos más altos.

La corriente demandada I_L es el valor medio máximo de la componente fundamental de corriente que se registra durante la observación. Como el período de observación por lo general se toma una semana o un mes.

Para explicar la diferencia entre THD y TDD vamos a utilizar un ejemplo. Se supone que la componente fundamental de la corriente en el circuito se cambia entre 1000 A y 10 A. La deformación de la forma de onda de corriente es más o menos en el mismo nivel en todo el rango de variación de la componente fundamental y tiene un nivel resultante del factor THD-F aprox. 50%. Si generamos un gráfico de cambios del factor THD en el tiempo, recibimos más o menos un valor constante de 50% en todo el intervalo de tiempo. Debemos tener en cuenta que a pesar de que en el intervalo analizado la componente fundamental ha cambiado 100 veces, sobre la base del gráfico del THD no se puede sacar ninguna conclusión acerca de las pérdidas de energía en el circuito resultantes del flujo de armónicos. Si generáramos un gráfico similar del factor TDD, sería similar al gráfico de la componente fundamental: los valores máximos del TDD alcanzarían el 50%, y los valores mínimos aprox. 0,5%. Por lo tanto, TDD refleja mejor los cambios del valor eficaz de armónicos más altos, si la corriente alcanza el valor máximo, el valor TDD es similar a THD, sin embargo, si el valor de corriente en el circuito disminuye, también disminuye el factor TDD.

Para calcular el factor TDD se requiere determinar antes o calcular la corriente I_L . Los analizadores PQM proporcionan dos métodos posibles:

- automático - la corriente I_L se determina por la aplicación como el valor medio máximo registrado de la componente fundamental de la corriente (en todo el intervalo de registro entre todos los canales de corriente medidos). El analizador, después de activar el registro TDD registra automáticamente los parámetros necesarios para el cálculo de este valor,
- manual – la corriente I_L es proporcionada por el usuario (en la aplicación, en el análisis de datos). Los valores TDD se calculan en base al valor introducido.

6.6 Desequilibrio

El desequilibrio es un concepto relacionado con los sistemas trifásicos y puede referirse a:

- desequilibrio de tensiones de alimentación,
- desequilibrio de corrientes de carga,
- desequilibrio de receptor.

El desequilibrio de tensiones (corrientes) se produce en los sistemas de tres fases, cuando los valores de tensiones (corrientes) son diferentes entre sí y/o los ángulos entre las fases particulares son diferentes de 120° .

El desequilibrio de receptor se produce cuando las impedancias de cada rama del receptor no son iguales.

Estos fenómenos son particularmente peligrosos para los motores trifásicos en los que incluso una ligera asimetría puede conducir muchas veces a mayores desequilibrios de corrientes. En tales condiciones, el par rotativo de motor se reduce y se producen mayores pérdidas de calor en los devanados y mayor desgaste mecánico. El desequilibrio es también negativo para los transformadores de alimentación.

La fuente más común de desequilibrio es la carga desigual de las fases particulares. Un buen ejemplo es la conexión a la red trifásica unas grandes cargas monofásicas, tales como motores de tracción ferroviaria.

El analizador PQM-700 puede medir el desequilibrio de tensión y corriente según el método de componentes simétricas. Este método se basa en la suposición de que cada conjunto de tres vectores desequilibrados se puede descomponer en tres grupos de vectores: la componente de secuencia positiva, negativa y cero.

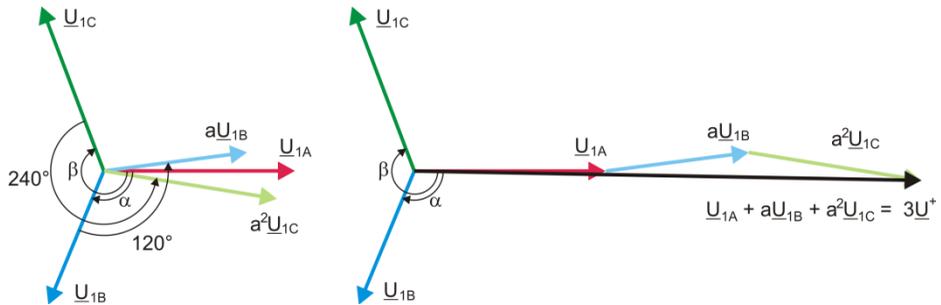


Fig. 19. Ejemplo de determinación de componente de secuencia positiva.

Como ejemplo se muestra el cálculo de componente de secuencia positiva de tensión. De definición:

$$\underline{U}^+ = \frac{1}{3}(\underline{U}_{1A} + a\underline{U}_{1B} + a^2\underline{U}_{1C})$$

donde: \underline{U}^+ es el vector de componente de secuencia positiva,

\underline{U}_{1A} , \underline{U}_{1B} , \underline{U}_{1C} son vectores de las componentes fundamentales de las tensiones de fase U_A , U_B , U_C

$$a = 1e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j$$

$$a^2 = 1e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j$$

La Fig. 19 es una representación gráfica de la determinación de esta componente. Como se puede ver en la definición dada, el vector de componente de secuencia positiva es igual a un tercio de la suma de las componentes: \underline{U}_{1A} , $a\underline{U}_{1B}$, $a^2\underline{U}_{1C}$. El operador a y a^2 son los vectores con ángulos

de 120° y 240°. El procedimiento es el siguiente: vector de tensión \underline{U}_{TB} se debe girar 120° en sentido contrario al de las agujas del reloj (multiplicación por a) y añadir el vector \underline{U}_{TA} . A continuación, el vector \underline{U}_{TC} se debe girar 240° y añadir a la suma anterior de vectores. El vector resultante es $3\underline{U}_t$. El vector \underline{U}^+ es la componente simétrica buscada de la secuencia positiva. Debemos tener en cuenta que en caso de la simetría perfecta (tensiones y ángulos iguales) la componente de secuencia positiva será igual al valor de las tensiones de fase.

La componente de secuencia positiva es una medida de similitud entre el grupo examinado de vectores trifásicos al grupo simétrico de vectores de la secuencia positiva.

Del mismo modo, la componente de secuencia negativa es una medida de la similitud con el conjunto equilibrado de los vectores de secuencia negativa de tres fases.

La componente de secuencia cero existe en el sistema, en el que la suma de las tres tensiones (o corrientes) no es igual a cero.

La magnitud ampliamente utilizada en la energética que caracteriza la asimetría de red son los factores de asimetría de la componente de secuencia negativa y cero (fórmulas para la tensión)

$$u_0 = \frac{U_0}{U_1} \cdot 100\%$$

$$u_2 = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\%$$

donde: u_0 – factor de desequilibrio de componente cero,

u_2 – factor de desequilibrio de componente de secuencia negativa,

U_0 – componente simétrica cero,

U_1 – componente simétrica positiva,

U_2 – componente simétrica negativa.

El método más conveniente para calcular las componentes simétricas y los factores de desequilibrio es el uso de los números complejos. Los parámetros de vectores son: amplitud de la componente fundamental de tensión (corriente) y su ángulo absoluto de desplazamiento de fase. Ambos valores se obtienen de la transformada FFT.

6.7 Huecos, subidas e interrupciones de tensión u

Huecos, subidas e interrupciones de tensión son las perturbaciones de la red, durante estos eventos la tensión eficaz es significativamente diferente del valor nominal. Cada uno de estos tres estados puede ser detectado por el analizador después de activar la detección de eventos y determinar los umbrales por parte de usuario.

El hueco de tensión es un estado en el que la tensión eficaz es menor que el umbral fijado por el usuario. La base de la medición del hueco es el valor $U_{RMS(1/2)}$, es decir, el valor eficaz periódico actualizado cada semiperíodo.

Definición de hueco (según la norma IEC 61000-4-30):

El hueco de tensión comienza en el momento en el que la tensión $U_{RMS(1/2)}$, cae por debajo del umbral y termina en el momento en el que el valor eficaz de tensión $U_{RMS(1/2)}$ es igual o mayor que el umbral del hueco aumentado por la histéresis de tensión.

El umbral de hueco se ajusta normalmente al 90% U_{nom} . Durante el hueco, el analizador almacena el valor registrado mínimo de la tensión (este valor es llamado la tensión residual U_{res} y es uno de los parámetros que caracterizan el hueco) y el valor medio de tensión.

La interrupción de alimentación es un estado en el que la tensión $U_{RMS(1/2)}$ es menor que el umbral definido para la interrupción. El umbral de interrupción se fija generalmente mucho menor que el umbral de hueco, es alrededor de 1..10% U_{nom} .

La interrupción de tensión comienza en el momento en el que la tensión $U_{RMS(1/2)}$ cae por debajo del umbral de interrupción y termina en el momento en el que el valor eficaz de tensión $U_{RMS(1/2)}$ es igual o mayor que el umbral de interrupción aumentado por la histéresis de tensión.

Durante la interrupción, el analizador guarda la tensión mínima registrada y el valor medio de tensión.

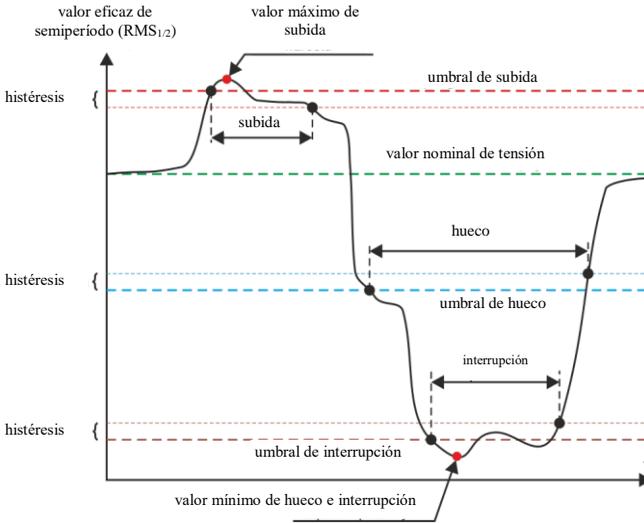


Fig. 20. Subidas, huecos e interrupciones de tensión.

La subida es un estado del valor más alto de tensión. El umbral de subida se fija generalmente a un 110% U_{nom} . La subida comienza en el momento en el que la tensión $U_{RMS(1/2)}$ sube por encima del umbral de subida y termina en el momento en que el valor de tensión $U_{RMS(1/2)}$ es igual o menor que el umbral de elevación disminuido por la histéresis de tensión. Durante la subida, el analizador guarda la tensión máxima registrada y el valor medio de tensión.

La histéresis para los tres estados es la misma y se expresa como el valor en porcentaje de la tensión nominal determinado por el usuario (parámetro **Histéresis de detección de eventos**).

El analizador almacena la hora de inicio y final del evento (con una precisión de semiperíodo).

La duración mínima del evento de hueco, interrupción y subida es el semiperíodo.

Los valores $U_{RMS(1/2)}$ se determinan durante 1 período en el momento del paso por cero de la componente fundamental de tensión y son actualizados cada medio ciclo independientemente para cada canal de tensión. Esto significa que estos valores se obtienen en diferentes momentos para diferentes canales. Fig. 21 muestra el método para determinar el valor $RMS_{1/2}$ usando el ejemplo de dos fases de tensión. Información sobre el paso por cero de la componente fundamental se obtiene mediante FFT.

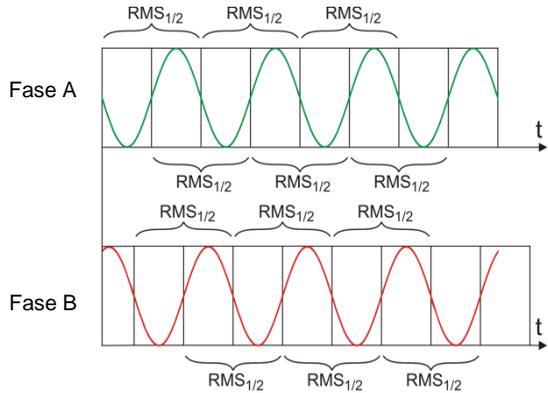


Fig. 21. Determinación del valor $U_{RMS(1/2)}$

6.8 Curvas CBEMA y ANSI

La curva CBEMA fue propuesta por primera vez en los años 70 del siglo pasado por la organización de la que proviene el nombre de la curva, *Computer and Business Equipment Manufacturers Association* (ahora es la organización ITI, *Information Technology Industry*), que agrupa a los fabricantes de equipos informáticos y de oficina. La curva se utilizó como una indicación en la construcción de alimentadores de red y presentaba originalmente el gráfico de tolerancia de equipo para el tamaño y la duración de las perturbaciones en la red eléctrica. Más tarde, la curva era utilizada en el diseño de equipos sensibles a las fluctuaciones de tensión como el intervalo de referencia en el que el equipo debe funcionar correctamente. Finalmente la curva comenzó a ser ampliamente utilizada en el análisis de la calidad de alimentación respecto a las perturbaciones como sobretensión, interrupción y hueco en la red.

En el gráfico, en el eje vertical se muestra la tensión especificada como un porcentaje respecto al valor nominal, y en el eje horizontal la unidad es el tiempo (en escala logarítmica). La parte media del gráfico (entre las curvas) representa el área del trabajo correcto del dispositivo. La zona superior establece los estados de tensión más alta que pueden causar daños o disparo de protección contra la sobretensión, el área debajo de las curvas se refiere a la situación de baja tensión en la red, lo que podría interrumpir el suministro de energía o la escasez temporal de energía e influir en un funcionamiento incorrecto del equipo.

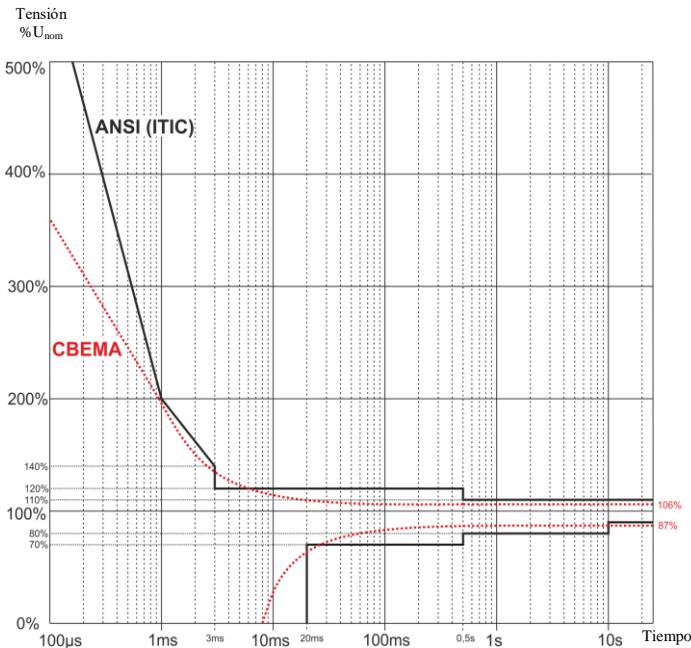


Fig. 22. Curvas de tolerancia de tensión de alimentación ANSI (ITIC) y CBEMA.

Como muestra el gráfico, existe una relación entre la tensión y el tiempo de aparición del evento. Por ejemplo, la subida de tensión a nivel del 200%U_{nom} y la duración de 1 ms en los casos típicos no da lugar a fallo o mal funcionamiento (punto entre las curvas), pero la perturbación de esta amplitud que dura medio período de la red puede tener malas consecuencias (punto por encima de ambas curvas). En general se considera que en una situación típica, los eventos que se producen en la red eléctrica cuando se trata del valor de la tensión de red deben estar en la zona central de la tabla (entre las curvas) y entonces no deberían conducir a fallos de funcionamiento o daños de dispositivos conectados. Los fabricantes de dispositivos (especialmente las fuentes de

alimentación) a menudo se guían por este gráfico cuando diseñan para garantizar su funcionamiento sin averías y el mantenimiento de la tensión de salida adecuada en esta área. Hay que tener en cuenta, que la curva representa los casos típicos y no puede garantizar el funcionamiento correcto de cada dispositivo, ya que la tolerancia a la perturbación varía.

La curva ITIC es el sucesor de la curva CBEMA, fue desarrollada por ITI en 1994 y modificada posteriormente a su forma actual en 2000. Esta curva fue adaptada por el Instituto Americano de Normalización ANSI (en inglés *American National Standards Institute*). Las dos curvas se muestran en la Fig. 22.

El programa *Sonel Analysis* posibilita modificar los puntos característicos de las curvas, lo que permite que se adapten a las necesidades específicas del usuario.

6.9 Cálculo de la media de los resultados de las mediciones

La supervisión de red durante un período de tiempo más largo significa la acumulación de grandes cantidades de datos. Para que sea posible el análisis de datos era necesario introducir mecanismos que reduzcan el tamaño de los datos a un tamaño aceptable tanto para la máquina como el hombre.

Un ejemplo es el examen de la red para el cumplimiento de la calidad eléctrica EN 50160. El período básico de pruebas de la red es de una semana. Si guardamos todos los valores eficaces de tensión de 200 milisegundos obtenemos 3.024.000 mediciones. El procesamiento de esta cantidad de datos puede ser largo y difícil.

Por lo tanto, se promedian los datos, lo que implica que para el análisis se registra un único valor para un período de tiempo especificado. Para la norma EN 50160 el período establecido es de 10 minutos. En este caso, el analizador calcula el valor medio de 10 minutos basándose en unos 3000 valores de 200 milisegundos (aproximadamente, ya que el valor de 200 milisegundos es en realidad el valor de 10/12 períodos sincronizado con la frecuencia de red). Cada 10 minutos se almacena el siguiente valor medio de tensión, lo que conduce a guardar "sólo" 1008 resultados de medición.

En la Fig. 23 se muestra cómo el analizador PQM-700 determina el valor medio para los tiempos mayores o iguales a 10 segundos, se presenta un ejemplo de tiempo de cálculo de media durante 10 minutos. Este método cumple con los requisitos para la clase S de la norma IEC 61000-4-30.

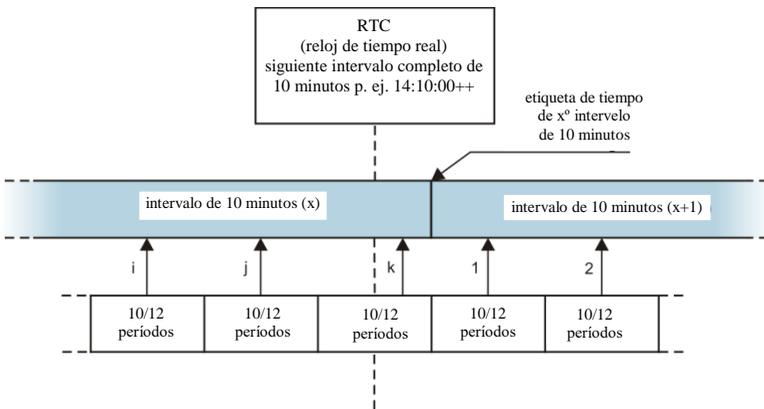
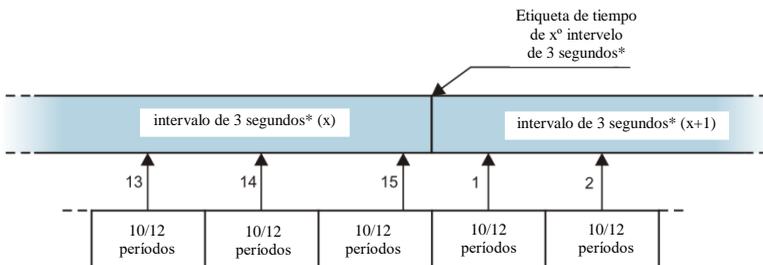


Fig. 23. Determinación de períodos del cálculo de media más largos (o iguales) a 10 segundos (por ejemplo para 10 minutos)

Los valores medios se sincronizan con el reloj en tiempo real de la siguiente manera. Cuando el reloj mide el siguiente múltiplo entero del período para el cálculo de la media, la medición actual de 10/12 períodos se añade como la última medición para el valor medio (k^{a} medición en la Fig. 23). Al mismo tiempo el período para el cálculo de la media que acaba de terminar, recibe la etiqueta de tiempo correspondiente a su finalización. La siguiente medición de 10/12 períodos es la primera medición en el siguiente intervalo de cálculo de la media.

Esta situación es un poco diferente en tiempos menores a 10 segundos. Aunque todos los períodos se expresan en unidades de tiempo (200 ms, 1 s, 3 s, 5 s), en realidad se miden en múltiplos del período de red. Por ejemplo, la selección del intervalo de tiempo de 3 segundos significa el tiempo de cálculo de la media durante 150/180 períodos de red (15 mediciones de 10/12 períodos).

El método de determinación de los valores medios de dichos períodos muestra la Fig. 24. Aquí no se aplica la sincronización con el reloj de tiempo real. Después de recoger un determinado número de medidas de 10/12 períodos, el intervalo actual de cálculo de la media se termina y comienza el siguiente. La etiqueta de tiempo corresponde al final del período.



(*) en realidad es un intervalo de 150/180 períodos

Fig. 24. Determinación de intervalos de cálculo de media más cortos que 10 segundos (por ejemplo para el cálculo de promediación de 3 segundos)

Ya que se promedian las mediciones, se pierden los valores extremos. Cuando la información sobre los valores límite del parámetro medido es importante, el usuario puede utilizar la opción de medir el valor mínimo, máximo e instantáneo durante el período de cálculo de la media. Si se mide el parámetro durante 10/12 períodos, el valor máximo y mínimo es respectivamente el valor más grande y más pequeño de 10/12 períodos medidos en un intervalo dado. En cambio, el valor actual es el valor último de 10/12 períodos en el intervalo dado para promediar.

En caso de los valores eficaces de tensiones y corrientes, el método de búsqueda de los valores mínimos y máximos es más flexible y es controlado por el parámetro **Periodo para determinar el valor mín./máx.** El usuario puede usar las siguientes opciones: semiperíodo, 200 ms, 1 s, 3 s y 5 s. La selección de semiperíodo permite buscar el valor mínimo y máximo con la sensibilidad más alta, con la precisión hasta el valor $U_{RMS(1/2)}$. Ampliando este tiempo se buscan los valores menos extremos, por ejemplo, en caso de 5 segundos primero se calcula el valor medio de 5 segundos, que luego se utiliza para encontrar el valor mínimo y máximo. Esto da menos sensibilidad a los cambios instantáneos del valor medido.

Nota: igual que en caso de los períodos de cálculo de la media menores a 10 segundos, los tiempos de 200 ms, 1 s, 3 s y 5 s son de hecho expresados en múltiplos del período de la red, respectivamente, 10/12, 50/60, 150/180 y 250/300 períodos de red.

La selección del tiempo adecuado para calcular la media no es una tarea sencilla. En gran medida esta selección está condicionada por el tipo de interferencias presentes en la red y las expectativas del usuario respecto al análisis final de los datos. A menudo hay una situación en la que sólo se es consciente de la existencia de ciertos problemas en la red de abastecimiento y las mediciones con el analizador deben ayudar a identificar la causa exacta. En esta situación es mejor utilizar más cortos tiempos de cálculo de la media (por ejemplo de 10 segundos) y activar el registro

7 Datos técnicos

de los valores máximos y mínimos (para las tensiones y corrientes se recomienda en esta situación elegir el período que determina el valor mínimo y máximo durante el menor tiempo posible, que es la mitad del período). El corto tiempo de cálculo de la media permite hacer los gráficos más precisos de cambio de los parámetros en el tiempo; los mínimos y máximos se detectan y se guardan. Los registros con cortos tiempos de cálculo de la media se realizan normalmente en un período de tiempo bastante limitado, principalmente debido al rápido crecimiento de los datos, el propósito de dicho registro es detectar la posible causa de anomalías en lugar del análisis a largo plazo.

El registro con el corto tiempo de cálculo de la media puede ser suficiente para evaluar el rendimiento de la red y las perturbaciones que aparecen en ella. Sin embargo, la información detallada se puede conseguir posiblemente durante un período de tiempo más largo (en minutos) registrando el valor mínimo y máximo y la detección de eventos activa. Una ventaja importante de esta situación es que el volumen de los datos registrados es mucho menor, lo que significa una lectura más rápida y análisis.

La prueba de calidad de alimentación se lleva a cabo de conformidad con los criterios de la norma EN 50160. En este caso, el análisis se lleva a cabo durante un período más largo (p.ej. 7 días), por lo tanto el tiempo de cálculo de la media seleccionado también es largo, es de 10 minutos.

Hay que tener en cuenta que no existe un ajuste ideal para establecer el tiempo de cálculo de la media y otros parámetros o umbrales de eventos. Cada red es diferente y hay diferentes objetivos para examinar la red. Por lo tanto, la configuración óptima del analizador puede requerir varios intentos y también depende de la experiencia del operario.

7 Datos técnicos

- Las especificaciones técnicas pueden modificarse sin previo aviso. Las últimas ediciones de la documentación técnica están disponibles en la página www.sonel.pl.
- La incertidumbre básica es la incertidumbre del instrumento de medición en condiciones de referencia dadas en la Tabla 5.
- Las incertidumbres dadas conciernen al analizador PQM-700 sin transformadores y pinzas adicionales.
- Abreviaturas:
 - v.m. - valor medido patrón,
 - U_{nom} – valor nominal de tensión,
 - I_{nom} – rango nominal de corriente (pinzas),
 - RMS – valor eficaz,
 - n – orden de armónico,
 - c.s. – cifras significativas – respecto a la resolución del resultado de medición es el registro del valor que indica el número de dígitos significativos, por ejemplo la resolución para el voltaje de 230 V y 4 c.s. es igual a 0,1 V (pone 230,0 V); la resolución para la corriente 5 A y 4 c.s. es 0,001 A (pone 5,000 A).
 - δ_{ph} – incertidumbre adicional resultante del error de medición de la fase entre armónicos de tensión y de corriente.

7.1 Entradas

Entradas de tensión	
Número de entradas	4 (L1, L2, L3, N, PE - 3 trayectos de medición)
Tensión máxima de entrada	760 V _{RMS} 40...70 Hz o DC
Categoría de medida	CAT IV 300 V / CAT III 600 V / CAT II 760 V
Tensión de cresta de entrada (sin cortar)	±1150 V
Banda analógica de transmisión (-3 dB)	12 kHz
Transformadores	definidos por el usuario
Impedancia de entradas de medición	14 MΩ
CMRR	70 dB (50 Hz)

Entradas de corriente	
Número de entradas	4 (3 fases + neutro) no aisladas, galvanizadas
Tensión nominal de entrada (pinzas CT)	1 V _{RMS}
Tensión de cresta de entrada (pinzas CT; sin eliminación de la señal)	±3,6 V
Tensión nominal de entrada (pinzas flexibles)	0,125 V _{RMS}
Tensión de cresta de entrada (pinzas flexibles; sin eliminación de la señal)	±0,45 V
La tensión máxima permitida de entrada de la pinza respecto a la tierra	5 V _{RMS}
Banda analógica de transmisión (-3 dB)	12 kHz
Impedancia de entrada	Trayecto de pinzas rígidas: 100 kΩ Trayecto de pinzas flexibles: 12,4 kΩ
Rango de medición (sin transformadores)	Pinzas flexibles F-1(A)/F-2(A)/F-3(A): 1..3000 A (±10 kA en cresta, 50 Hz) Pinzas flexibles F-2AHD/F-3AHD: 1..3000 A (±10 kA en cresta, 50 Hz) Pinzas flexibles F-1A6/F-2A6/F-3A6: 1..6000 A (±20 kA en cresta, 50 Hz) Pinzas flexibles F-1A1/F-2A1/F-3A1: 1..1500 A (±5 kA en cresta, 50 Hz) Pinzas CT C-4(A), C-5A: 1..1000 A (±3600 A en cresta) Pinzas CT C-6(A): 0,01..10 A (±36 A en cresta) Pinzas CT C-7(A): 0..100 A (±360 A en cresta)
Transformadores	definidos por el usuario
CMRR	60 dB (50 Hz)

7.2 Muestreo y reloj RTC

Muestreo y reloj RTC	
Transductor A/C	de 16 bits
Velocidad de muestreo	10,24 kHz para 50 Hz y 60 Hz Muestreo simultáneo en todos los canales
Muestras por período	204,8 para 50 Hz; 170,67 para 60 Hz
Sincronización PLL	40...70 Hz
Canal de referencia para el sistema PLL	L1
Reloj de tiempo real	±3,5 ppm máx. (aprox. ±9 segundos/mes) en el rango de temperatura -20°C...+55°C

7.3 Parámetros medidos: precisión, resolución y rango

7.3.1 Condiciones de referencia

Tabla 5. Condiciones de referencia.

Condiciones de referencia	
Temperatura ambiente	23°C ±2°C
Humedad relativa	40...60%
Desequilibrio de tensión	≤ 0,1% para el factor de desequilibrio de secuencia negativa (sólo en sistemas trifásicos)
Campo magnético externo continuo	≤ 40 A/m (continuo) ≤ 3 A/m (variable) para la frecuencia 50/60 Hz
Componente constante de tensión y corriente	cero
Formas de onda	sinusoidales
Frecuencia	50 Hz ±0,2% o 60 Hz ±0,2%

7.3.2 Tensión

Tensión	Rango y condiciones	Resolución	Incertidumbre básica
U_{RMS} (AC+DC)	$20\% U_{nom} \leq U_{RMS} \leq 120\% U_{nom}$ para $U_{nom} \geq 100V$	4 c.s.	$\pm 0,5\% U_{nom}$
Factor de cresta	1...10 (1...1,65 para la tensión de 690 V) para $U_{RMS} \geq 10\% U_{nom}$	0,01	$\pm 5\%$

7.3.3 Corriente

Corriente	Rango y condiciones	Resolución	Incertidumbre básica
I_{RMS} (AC+DC)	Entrada sin pinzas		
	línea de pinzas CT: 0..1 V (máx. ± 3.6 V)	4 c.s.	$\pm 0,2\% I_{nom}$
	línea de pinzas flexibles: 0..125 mV (máx. ± 450 mV)		
	Pinzas flexibles F-1(A)/F-2(A)/F-3(A)		
	0..3000 A (± 10 kA)	4 c.s.	Incertidumbre adicional $\pm 1\%$ ($\pm 2\%$ teniendo en consideración el error adicional que depende de la posición)
	Pinzas flexibles F-2AHD/F-3AHD		
	0..3000 A (± 10 kA max)	4 c.s.	Incertidumbre adicional $\pm 0,5\%$ ($\pm 2\%$ z uwzględnieniem błędu dodatkowego od położenia)
	Pinzas flexibles F-1A6/F-2A6/F-3A6		
	0..6000 A (± 20 kA max)	4 c.s.	Incertidumbre adicional $\pm 1\%$ ($\pm 2\%$ teniendo en consideración el error adicional que depende de la posición)
	Pinzas flexibles F-1A1/F-2A1/F-3A1		
	0..1500 A (± 5 kA max)	4 c.s.	Incertidumbre adicional $\pm 1\%$ ($\pm 2\%$ teniendo en consideración el error adicional que depende de la posición)
	Pinzas CT C-4(A)		
	0...1000 A (± 3600 A)	4 c.s.	Incertidumbre adicional 0,1..10 A: $\pm (3\% + 0,1$ A) 10 A: $\pm 3\%$ 50 A: $\pm 1,5\%$ 200 A: $\pm 0,75\%$ 1000..1200 A: $\pm 0,5\%$
	Pinzas CT C-5A		
0..1000 A (± 3600 A)	4 c.s.	Incertidumbre adicional 0,5..100 A: $\leq (1,5\% + 1$ A) 100..800 A: $\leq 2,5\%$ 800..1000 A AC: $\leq 4\%$ 1000..1400 A DC: $\leq 5\%$	
Pinzas CT C-6(A)			
0..10 A (± 36 A)	4 c.s.	Incertidumbre adicional 0,01..0,1 A: $\pm (3\% + 1$ mA) 0,1..1 A: $\pm 2,5\%$ 1..12 A: $\pm 1\%$	
Pinzas CT C-7(A)			
0..100 A (± 360 A)	4 c.s.	Incertidumbre adicional 0..100 A: $\pm (0,5\% + 0,02$ A) (45..65 Hz) 0..100A: $\pm (1,0\% + 0,04$ A) (40..1000 Hz)	
Factor de cresta	1..10 (1..3,6 para I_{nom}) para $I_{RMS} \geq 1\% I_{nom}$	0,01	$\pm 5\%$

7.3.4 Frecuencia

Frecuencia	Rango y condiciones	Resolución	Incertidumbre básica
f	40..70 Hz $10\% U_{nom} \leq U_{RMS} \leq 120\% U_{nom}$	0,01 Hz	$\pm 0,05$ Hz

7.3.5 Armónicos

Armónicos	Rango y condiciones	Resolución	Incertidumbre básica
Orden del armónico (n)	DC, 1..40, agrupación: subgrupos armónicos según IEC 61000-4-7		
Amplitud U_{RMS}	$0..200\% U_{nom}$	4 c.s.	$\pm 0,15\% U_{nom}$ si v.m. < $3\% U_{nom}$ $\pm 5\%$ v.m. si v.m. $\geq 3\% U_{nom}$ (según IEC 61000-4-7 clase II)
Amplitud I_{RMS}	Dependiendo de las pinzas utilizadas (ver especificación I_{RMS})	4 c.s.	$\pm 0,5\% I_{nom}$ si v.m. < $10\% I_{nom}$ $\pm 5\%$ v.m. si v.m. $\geq 10\% I_{nom}$ (según IEC 61000-4-7 clase II)
THD-R de tensión (n = 2..50)	$0,0...100,0\%$ para $U_{RMS} \geq 1\% U_{nom}$	0,1%	$\pm 5\%$
THD-R de corriente (n = 2..50)	$0,0...100,0\%$ para $I_{RMS} \geq 1\% I_{nom}$	0,1%	$\pm 5\%$
TDD (n = 2..40)	depende de I_L	depende de I_L	depende de I_L
Ángulo de fase (tensión)	$-180^\circ...+180^\circ$	0,1°	$\pm(n \times 1^\circ)$
Ángulo de fase (corriente)	$-180^\circ...+180^\circ$	0,1°	$\pm(n \times 1^\circ)$

7.3.6 Potencia y energía

Potencia y energía	Condiciones (para potencia y energía $80\% U_{nom} \leq U_{RMS} \leq 120\% U_{nom}$)	Resolución	Incertidumbre básica ⁽¹⁾
Potencia activa Energía activa	$2\% I_{nom} \leq I_{RMS} < 5\% I_{nom}$ $\cos\varphi = 1$	4 c.s.	$\sqrt{2,5^2 + \delta_{ph}^2} \%$
	$5\% I_{nom} \leq I_{RMS} \leq I_{nom}$ $\cos\varphi = 1$		$\sqrt{2,0^2 + \delta_{ph}^2} \%$
	$5\% I_{nom} \leq I_{RMS} < 10\% I_{nom}$ $\cos\varphi = 0,5$		$\sqrt{2,5^2 + \delta_{ph}^2} \%$
	$10\% I_{nom} \leq I_{RMS} \leq I_{nom}$ $\cos\varphi = 0,5$		$\sqrt{2,0^2 + \delta_{ph}^2} \%$
Potencia reactiva Energía reactiva	$2\% I_{nom} \leq I_{RMS} < 5\% I_{nom}$ $\sin\varphi = 1$	4 c.s.	$\sqrt{4,0^2 + \delta_{ph}^2} \%$
	$5\% I_{nom} \leq I_{RMS} < I_{nom}$ $\sin\varphi = 1$		$\sqrt{3,0^2 + \delta_{ph}^2} \%$
	$5\% I_{nom} \leq I_{RMS} < 10\% I_{nom}$ $\sin\varphi = 0,5$		$\sqrt{4,0^2 + \delta_{ph}^2} \%$
	$10\% I_{nom} \leq I_{RMS} < I_{nom}$ $\sin\varphi = 0,5$		$\sqrt{3,0^2 + \delta_{ph}^2} \%$
	$10\% I_{nom} \leq I_{RMS} < I_{nom}$ $\sin\varphi = 0,25$		$\sqrt{4,0^2 + \delta_{ph}^2} \%$
Potencia aparente Energía aparente	$2\% I_{nom} \leq I_{RMS} < 5\% I_{nom}$	4 c.s.	$\pm 2,5\%$
	$5\% I_{nom} \leq I_{RMS} \leq I_{nom}$		$\pm 2,0\%$
Factor de potencia (PF)	$0...1$ $50\% U_{nom} \leq U_{RMS} < 150\% U_{nom}$ $10\% I_{nom} \leq I_{RMS} < I_{nom}$	0,01	$\pm 0,03$
Factor de desplazamiento de fase (cosφ/DPF)	$0...1$ $50\% U_{nom} \leq U_{RMS} < 150\% U_{nom}$ $10\% I_{nom} \leq I_{RMS} < I_{nom}$	0,01	$\pm 0,03$

(1) Ver el sección 7.3.7.

7.3.7 Estimación de incertidumbre de medición de potencia y energía

Incertidumbre total de medición de potencia y de energía activa y reactiva (componente fundamental) y la potencia de armónicos se basa en general en la siguiente relación (para la energía se omite la incertidumbre adicional de la medición resultante de tiempo por ser mucho menor que otras incertidumbres):

$$\delta_{p,q} \cong \sqrt{\delta_{U_h}^2 + \delta_{I_h}^2 + \delta_{ph}^2}$$

donde: $\delta_{p,q}$ – incertidumbre de medición de potencia activa o reactiva,
 δ_{U_h} – incertidumbre sumaria de medición de amplitud armónica de tensión (analizador, transformadores, pinzas),
 δ_{I_h} – incertidumbre sumaria de medición de amplitud armónica de corriente (analizador, transformadores, pinzas),
 δ_{ph} – incertidumbre adicional resultante de error de medición de la fase entre armónicos de tensión y corriente.

La incertidumbre δ_{ph} puede ser determinada, si se conoce el ángulo de desplazamiento de fase para el rango de frecuencia que nos interesa. En la se presenta error de diferencia de fases entre armónicos de tensión y de corriente para el analizador PQM-700 (sin pinzas y transformadores).

Tabla 6. Error de fase del analizador PQM-700 dependiendo de la frecuencia.

Rango de frecuencia	0..200Hz	200..500Hz	500Hz..1kHz	1..2kHz	2..3kHz
Error	≤1°	≤2,5°	≤5°	≤10°	≤15°

El error de fase introducido por transformadores y pinzas utilizados en general se puede encontrar en su documentación técnica. En tal caso es necesario estimar el error resultante de fase entre tensión y corriente para la frecuencia que nos interesa e introducido por todos los elementos de medición como: transformadores de tensión y corriente, pinzas y analizador.

La incertidumbre de medición resultante de error de fase para la potencia activa de armónicos se puede determinar a base de la relación:

$$\delta_{ph} = 100 \left(1 - \frac{\cos(\varphi + \Delta\varphi)}{\cos\varphi} \right) [\%] \cos\varphi \neq 0,$$

En cambio, la incertidumbre de medición de potencia reactiva de armónicos se puede determinar a base de la relación:

$$\delta_{ph} = 100 \left(1 - \frac{\sin(\varphi - \Delta\varphi)}{\sin\varphi} \right) [\%] \sin\varphi \neq 0,$$

En ambas fórmulas φ significa el ángulo real de desplazamiento entre armónicos de corriente y tensión, y $\Delta\varphi$ error sumario de fase para la frecuencia dada. De las relaciones presentadas se puede deducir que la incertidumbre de medición de potencia, para el mismo error de fase, depende evidentemente del factor de desplazamiento de fase entre corriente y tensión. Esto se presenta en la Fig. 25.

Ejemplo

Cálculo de incertidumbre de medición de potencia activa de la componente fundamental.

Condiciones: $\varphi = 60^\circ$, $U_{RMS} \cong U_{nom}$, $I_{RMS} = 5\% I_{nom}$.

$$\pm \sqrt{1,0^2 + \delta_{ph}^2} \%$$

Incertidumbre básica es:

Para el rango de frecuencia de 0 a 200 Hz el error de fase de PQM-700 es 1° . Después de sustituir a la relación:

$$\delta_{ph} = 100 \left(1 - \frac{\cos(\varphi + \Delta\varphi)}{\cos\varphi} \right) = 100 \left(1 - \frac{\cos(61^\circ)}{\cos(60^\circ)} \right) = 3,04\%$$

por lo tanto, la incertidumbre de la medición es:

$$\delta = \pm \sqrt{1,0^2 + 3,04^2} = \pm 3,20\%$$

En las mismas condiciones, pero con el desplazamiento de fase $\varphi = 10^\circ$, obtendremos:

$$\delta_{ph} = 100 \left(1 - \frac{\cos(11^\circ)}{\cos(10^\circ)} \right) = 0,32\%$$

y la incertidumbre de la medición será:

$$\delta = \pm \sqrt{1,0^2 + 0,32^2} = \pm 1,05\%$$

Estos cálculos no tienen en cuenta los errores adicionales introducidos por las pinzas de corriente y los transformadores utilizados.

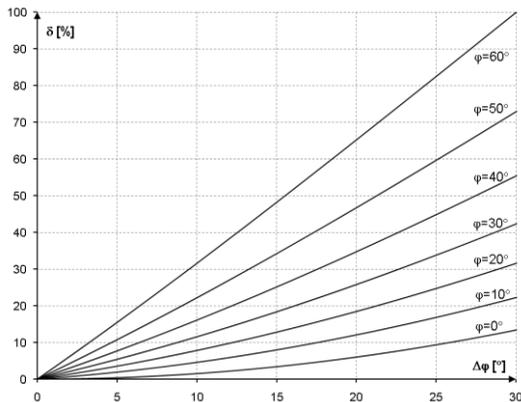


Fig. 25. La incertidumbre adicional resultante del error de fase, dependiendo del ángulo de desplazamiento de fase.

7.3.8 Parpadeo de luz

Parpadeo de luz (flicker)	Rango y condiciones	Resolución	Incertidumbre básica
P_{st} (10 min), P_{ri} (2 h)	0,4...10 para $U_{RMS} \geq 80\% U_{nom}$	0,01	$\pm 10\%$ dentro del límite de valores presentados en la tabla según la norma IEC 61000-4-15

7.3.9 Desequilibrio

Desequilibrio (tensión y corriente)	Rango y condiciones	Resolución	Incertidumbre básica
Factor de desequilibrio de secuencia positiva, negativa y cero	0,0%...10,0% para $80\% U_{nom} \leq U_{RMS} < 150\% U_{nom}$	0,1%	$\pm 0,3\%$ (incertidumbre absoluta)

7.4 Detección de eventos: valores eficaces de tensión y corriente

Tensión U_{RMS} (huecos, interrupciones y aumento)	Rango	Resolución	Incertidumbre básica
$U_{RMS(1/2)}$	0,0%...120,0% U_{nom}	4 c.s.	$\pm 1\% U_{nom}$
Umbral de detección	Ajustados por el usuario en porcentos o valores absolutos. Detección de eventos basada en la medición $U_{RMS(1/2)}$ (valor eficaz de 1 periodo actualizado cada $\frac{1}{2}$ periodo).		
Tiempo de duración	hh:mm:ss.ms	Semiperíodo	Un periodo
Registro de forma de onda	2 periodos antes del evento + 4 periodos después del evento (en total 6 periodos) 204,8/170,67 (50 Hz/60 Hz) muestras por periodo		

Corriente I_{RMS} (mín., máx.)	Rango	Resolución	Incertidumbre básica
$I_{RMS(1/2)}$	0,0%...100,0% I_{nom}	4 c.s.	$\pm 0,5\% I_{nom}$
Umbral de detección	Ajustados por el usuario en porcentos o valores absolutos. Detección de eventos basada en la medición $I_{RMS(1/2)}$ (valor eficaz de 1 periodo actualizado cada $\frac{1}{2}$ periodo).		
Tiempo de duración	hh:mm:ss.ms	Semiperíodo	Un periodo
Registro de forma de onda	2 periodos antes de evento + 4 periodos después de evento (en total 6 periodos) 204,8/170,67 (50 Hz/60 Hz) muestras por periodo		

7.5 Detección de eventos: otros parámetros

Parámetro	Rango	Método de detección
Frecuencia (mín., máx.)	40...70 Hz (porcentual o absoluta)	Detección basada en la medición de 10 s (según IEC 61000-4-30)
Factor de pico de tensión (mín., máx.)	1,0...10,0	Basándose en el valor de 10/12 periodos
Factor de pico de corriente (mín., máx.)	1,0...10,0	Basándose en el valor de 10/12 periodos
Factor de desequilibrio de componente de secuencia negativa de tensión (máx.)	0,0...20,0%	Basándose en el valor de 10/12 periodos
Factor de desequilibrio de componente de secuencia negativa de corriente (máx.)	0,0...20,0%	Basándose en el valor de 10/12 periodos
Flicker de corta duración P_{st} (máx.)	0..20	Basándose en el valor de 10 minutos
Flicker de larga duración P_L (máx.)	0..20	Basándose en el valor de 2 horas
Potencia activa P (mín., máx.)	Dependiendo de la configuración	Basándose en el valor de 10/12 periodos (para la potencia consumida y devuelta)
Potencia reactiva Q (mín., máx.)	Dependiendo de la configuración	Basándose en el valor de 10/12 periodos (para la potencia consumida y devuelta)
Potencia aparente S (mín., máx.)	Dependiendo de la configuración	Basándose en el valor de 10/12 periodos
Potencia de distorsión D/Potencia aparente de distorsión S_N (mín., máx.)	Dependiendo de la configuración	Basándose en el valor de 10/12 periodos
Factor de potencia PF (mín., máx.)	0...1	Basándose en el valor de 10/12 periodos
Factor de desplazamiento de fase $\cos\phi$ /DPF (mín., máx.)	0...1	Basándose en el valor de 10/12 periodos
$\tan\phi$ 4 cuadrantes (mín., máx.)	0...10	Basándose en el valor de 10/12 periodos
Energía activa E_p (máx.)	Dependiendo de la configuración	Si excede, se comprueba cada 10/12 periodos (para la energía consumida y devuelta)
Energía reactiva E_Q 4 cuadrantes (máx.)	Dependiendo de la configuración	Si excede, se comprueba cada 10/12 periodos (para la energía consumida y devuelta)

Energía aparente E_s (máx.)	Dependiendo de la configuración	Si excede, se comprueba cada 10/12 períodos
Factor de contenidos armónicos THD-F de tensión (máx.)	0...100%	Basándose en el valor de 10/12 períodos
Factor de contenidos armónicos THD-F de corriente (máx.)	0...200%	Basándose en el valor de 10/12 períodos
Amplitudes de armónicos de tensión (máx.)	0...100% o en absoluto	Basándose en el valor de 10/12 períodos; Umbrales independientes para todos los armónicos en el rango de 2...50
Amplitudes de armónicos de corriente (máx.)	0...200% o en absoluto	Basándose en el valor de 10/12 períodos; Umbrales independientes para todos los armónicos en el rango de 2...50

7.5.1 Histéresis de detección de eventos

Histéresis de detección de eventos	Rango	Método de cálculo
Histéresis	0..10%	Para cada uno de los parámetros se calcula como porcentaje del umbral máx.

7.6 Medición de corriente de arranque

Rango	Resolución	Error básico
0...100% I_n	4 c.s.	$\pm 0,5\% I_n$

- medición de tensión y corriente cada medio período en todos los canales (se promedia cada $\frac{1}{2}$ período),
- tiempo de medición hasta 60 s.

7.7 Registro

Registrador	
Tiempo para el cálculo de la media ⁽¹⁾	1 s, 3 s, 10 s, 30 s, 1 min, 5 min, 10 min, 15 min, 30 min. Modo especial: $\frac{1}{2}$ período (para el registro de ondas con el tiempo limitado de registro hasta 60 s, p.ej. para la corriente de arranque) ⁽²⁾
Cálculo de la media mín./máx. para U_{RMS}	$\frac{1}{2}$ período, período, 200 ms, 1 s, 3 s, 5 s ⁽³⁾
Cálculo de la media mín./máx. para I_{RMS}	$\frac{1}{2}$ período, período, 200 ms, 1 s, 3 s, 5 s ⁽³⁾
Captura de formas de onda	Posibilidad de registro de 3 períodos de formas de onda de canales activos después de cada período de cálculo de la media
Modo de activación de registro	manual desde primer evento detectado según horario (cuatro intervalos de tiempo definidos)
Puntos de medición	1, configuración independiente de usuario
Tiempo de registro	Dependiendo de la configuración
Memoria	Tarjeta de memoria de 2 GB incorporada
Modelo de memoria	Lineal
Seguridad	Posibilidad de bloqueo de teclado para evitar el acceso no autorizado

(1) Los tiempos de cálculo de la media menores a 10 s, de hecho, son iguales al múltiplo del período de red: 1 s - 50/60 períodos, 3 s - 150/180 períodos.

(2) $U_{RMS(1/2)}$ y $I_{RMS(1/2)}$ son los valores eficaces para un período, se actualizan cada medio período.

(3) Períodos de cálculo de la media mín./máx. de 1 s, 3 s en realidad equivalen al múltiplo del período de red: 1 s - 50/60 períodos, 3s - 150/180 períodos.

7 Datos técnicos

Parámetros registrados	Valor medio	Valor mínimo	Valor máximo	Valor instantáneo
Tensión eficaz de fase/entre fases (dependiendo del tipo de sistema) U_{RMS}	•	•	•	•
Tensión eficaz entre fases (sólo sistema de 3 fases tipo estrella con N y de 2 fases) U_{RMS}	•			
Corriente eficaz I_{RMS}	•	•	•	•
Frecuencia f	•	•	•	•
Factor de pico de tensión CF U	•	•	•	•
Factor de pico de corriente CF I	•	•	•	•
Factores de desequilibrio de secuencia positiva y negativa, componentes equilibradas de secuencia: positiva, negativa, cero (tensión) U_0, U_1, U_2, U_0, U_2	•	•	•	•
Factores de desequilibrio de secuencia positiva y negativa, componentes equilibradas de secuencia: positiva, negativa, cero (corriente) I_0, I_1, I_2, I_0, I_2	•	•	•	•
Indicadores de parpadeo de luz P_{st} y P_{fl}	•	•	•	•
Potencia activa (consumida y devuelta) P_+, P_-	•	•	•	•
Potencia reactiva (consumida y devuelta) $Q_{t+}, Q_{t-}/Q_{B+}, Q_{B-}$	•	•	•	•
Potencia aparente S	•	•	•	•
Potencia de distorsión D/ Potencia aparente de distorsión S_N	•	•	•	•
Factor de potencia PF	•	•	•	•
Factor de desplazamiento de fase $\cos\phi/DPF$	•	•	•	•
Coefficiente $\tan\phi$ (4 cuadrantes): $\tan\phi_{(L+)}, \tan\phi_{(C-)}, \tan\phi_{(L-)}, \tan\phi_{(C+)}$	•	•	•	•
Energía activa (consumida y devuelta) E_{P+}, E_{P-}				•
Energía reactiva (4 cuadrantes): $E_{Q(L+)}, E_{Q(C-)}, E_{Q(L-)}, E_{Q(C+)}$				•
Energía aparente E_S				•
Factor de distorsiones armónicas THD-F de tensión	•	•	•	•
Factor de distorsiones armónicas THD-F de corriente	•	•	•	•
Factor TDD	•			
Amplitudes de armónicos de tensión $U_{h1} \dots U_{h40}$	•	•	•	•
Amplitudes de armónicos de corriente $I_{h1} \dots I_{h40}$	•	•	•	•

7.8 Alimentación de la red, batería y calentador

Alimentación de la red		
Rango de tensiones de entrada (nominal)	100...415 V AC, 40...70 Hz 140...415 V DC	
Rango de tensiones de entrada (con fluctuaciones)	90...460 V AC, 40...70 Hz 127...460 V DC	
Categoría de sobretensión del alimentador	altitud hasta 4000 m: CAT IV 300 V / CAT III 415 V / CAT III 460 V (fluctuaciones incluidas) altitud 4000-5000 m: CAT III 300 V / CAT II 415 V / CAT II 460 V (fluctuaciones incluidas)	
Consumo de energía de la red (máximo)	30 VA	
Consumo de energía de la red en función de la configuración (típico)	sin carga de la batería, el calentador apagado, la fuente de alimentación 230 V AC	6 VA / 3 W
	sin carga de la batería, el calentador activado, la fuente de alimentación 230 V AC	11 VA / 8 W
	la carga de la batería, el calentador apagado, la fuente de alimentación 230 V AC	14 VA / 11 W
	la carga de la batería, el calentador activado, la fuente de alimentación 230 V AC	22 VA / 16 W
	la carga de la batería, el calentador activado, la fuente de alimentación 400 V AC	27 VA / 16 W

Batería	
Tipo	Li-Ion 4,4 Ah
Tiempo de funcionamiento con alimentación de batería	> 6 h
Tiempo de carga de batería (completamente descargada)	hasta 8 h
Rango de temperatura admisible de la carga	-10°C ...+60°C
Consumo de corriente de la batería en modo de analizador off (falta de alimentación de la red)	< 1 mA

Calentador	
Umbral de temperatura de encendido de calentador	+5°C
Alimentación del calentador	de fuente de alimentación incorporada
Potencia del calentador	hasta 5 W

7.9 Redes compatibles

Tipos de redes compatibles (directa e indirectamente)	
1 fase	Monofásica con conductor neutro (terminales L1, N)
2 fases (split-phase)	Bifásica con conductor neutro (terminales L1, L2, N)
3 fases tipo estrella con N	Trifásica de 4 hilos (terminales L1, L2, L3, N)
3 fases tipo triángulo	Trifásica de 3 hilos (terminales L1, L2, L3, N conectado con L3)
3 fases tipo triángulo de Aron	Trifásica de 3 hilos (terminales L1, L2, L3, N conectado con L3), con dos pinzas de corriente
3 fases tipo estrella sin N	Trifásica tipo estrella de 3 hilos (terminales L1, L2, L3, N conectado con L3)
3 fases tipo estrella sin N de Aron	Trifásica tipo estrella de 3 hilos (terminales L1, L2, L3, N conectado con L3), con dos pinzas de corriente

7.10 Pinzas de corriente compatibles

Tipos compatibles de pinzas de corriente	
F-1(A)	Pinza flexible (bobina de Rogowski), circunferencia de 120 cm, rango de medición 3000 A _{RMS}
F-2(A)	Pinza flexible (bobina de Rogowski), circunferencia de 80 cm, rango de medición 3000 A _{RMS}
F-3(A)	Pinza flexible (bobina de Rogowski), circunferencia de 45 cm, rango de medición 3000 A _{RMS}
F-2AHD	Pinza flexible (bobina de Rogowski), circunferencia de 91,5 cm, rango de medición 3000 A _{RMS}
F-3AHD	Pinza flexible (bobina de Rogowski), circunferencia de 45 cm, rango de medición 3000 A _{RMS}
F-1A6	Pinza flexible (bobina de Rogowski), circunferencia de 120 cm, rango de medición 6000 A _{RMS}
F-2A6	Pinza flexible (bobina de Rogowski), circunferencia de 80 cm, rango de medición 6000 A _{RMS}
F-3A6	Pinza flexible (bobina de Rogowski), circunferencia de 45 cm, rango de medición 6000 A _{RMS}
F-1A1	Pinza flexible (bobina de Rogowski), circunferencia de 120 cm, rango de medición 1500 A _{RMS}
F-2A1	Pinza flexible (bobina de Rogowski), circunferencia de 80 cm, rango de medición 1500 A _{RMS}
F-3A1	Pinza flexible (bobina de Rogowski), circunferencia de 45 cm, rango de medición 1500 A _{RMS}
C-4(A)	Pinzas tipo CT, AC, rango de medición 1000 A _{RMS} , 1 mV/A
C-5A	Pinzas tipo CT con sensor de efecto Hall, AC/DC, rango de medición 1000 A _{RMS} , 1 mV/A
C-6(A)	Pinzas tipo CT, AC, para corrientes bajas, rango de medición 10 A _{RMS} , 1 mV/10 mA
C-7(A)	Pinzas tipo CT, AC, rango de medición 100 A _{RMS} , 5 mV/A

NOTA: La pinza con la letra A al final del nombre (por ejemplo F-3A) es un tipo de pinza con la detección automática de su tipo en dispositivos compatibles. Los otros parámetros son los mismos que en caso de la pinza sin esta detección. La detección del tipo de pinza está disponible en los analizadores PQM-700 en las versiones de hardware HWc y más nuevos, junto con el firmware 1.30 o más nuevo.

7.11 Comunicación

Comunicación	
USB	Velocidad máxima de transmisión: 921,6 kbit/s Compatible con USB 2.0

7.12 Condiciones ambientales y otros datos técnicos

Condiciones ambientales	
Rango de temperatura de trabajo	-20°C...+55°C
Rango de temperatura de almacenamiento	-30°C...+60°C
Humedad	10...90% con condensación posible
Altitud operativa	hasta 4000 m (4000-5000 m con categoría de medición rebajada CAT III 300 V / CAT II 600 V)
Estanqueidad (según IEC 60529)	IP 65
Condiciones de referencia	Temperatura ambiente: 23°C ±2°C Humedad: 40...60%
Dimensiones	200 x 180 x 77 mm (sin cables)
Peso	aprox. 1,6 kg
Pantalla	5 diodos LED que indican el estado de trabajo
Memoria de datos	tarjeta de memoria extraíble de 2 GB (estándar), ampliable hasta 32 GB (opcional).

7.13 Seguridad y compatibilidad electromagnética

Seguridad y EMC	
Conformidad con	IEC 61010-1, edición 3.0
Categoría de medición (entradas de medición)	Altitud hasta 4000 m: IV 300 V / III 600 V / II 760V Altitud 4000-5000 m: III 300 V / II 600 V clase de contaminación 2
Categoría de sobretensión (alimentador de la red)	Altitud hasta 4000 m: IV 300 V / III 415 V / III 460 V (incluyendo las fluctuaciones) Altitud 4000-5000 m: III 300 V / II 415 V / II 460 V (incluyendo las fluctuaciones) clase de contaminación 2
Aislamiento	Doble según IEC 61010-1
Compatibilidad electromagnética	IEC 61326
Resistencia a alteraciones con frecuencias de radio	IEC 61000-4-3 modulación sinusoidal 80% AM, 1 kHz 80...1000 MHz, 10 V/m 1,4...2,0 GHz, 3 V/m 2,0...2,7 GHz, 1 V/m
Resistencia a descargas electrostáticas	IEC 61000-4-2 Descarga en aire: 8 kV Descarga al contacto: 4 kV
Resistencia a perturbaciones conducidas, inducidas por campos de radiofrecuencia	IEC 61000-4-6 modulación sinusoidal 80% AM, 1 kHz 0,15...80 MHz, 10 V
Resistencia a series de estados rápidos eléctricos transitorios	IEC 61000-4-4 Amplitud 2 kV, 5 kHz
Resistencia a hipertermias	IEC 61000-4-5 Amplitud 2 kV (L-L)
Emisión de alteraciones radiadas con radiofrecuencia	IEC 61000-6-3 30...230 MHz, 30 dB(μV/m) en distancia de 10m 230...1000 MHz, 37 dB(μV/m) en distancia de 10m
Emisión de alteraciones conducidas	IEC 61000-6-3 Niveles para el detector cuasi-pico: 0,15 kHz...0,5 MHz: 66 dBμV...56 dBμV 0,5 MHz...5 MHz: 56 dBμV 5 MHz...30 MHz: 60 dBμV

7.14 Estándares

Estándares	
Métodos de medición	IEC 61000-4-30 clase S
Precisión de mediciones	IEC 61000-4-30 clase S
Calidad de energía	EN 50160
Parpadeo de luz	IEC 61000-4-15
Armónicos	IEC 61000-4-7
Estándar de calidad	elaboración, proyecto y producción de acuerdo con ISO 9001

8 Accesorios adicionales

La lista completa de accesorios se puede encontrar en el sitio web del fabricante.

					
	C-4A	C-5A	C-6A	C-7A	
	WACEGC4AOKR	WACEGC5AOKR	WACEGC6AOKR	WACEGC7AOKR	
Corriente nominal	1000 A AC	1000 A AC 1400 A DC	10 A AC	100 A AC	
Frecuencia	30 Hz...10 kHz	DC...5 kHz	40 Hz...10 kHz	40 Hz...1 kHz	
Diámetro máx. del conductor medido	52 mm	39 mm	20 mm	24 mm	
Precisión mínima	≤0,5%	≤1,5%	≤1%	0,5%	
Alimentación con baterías	—	√	—	—	
Longitud de cable	2,2 m	2,2 m	2,2 m	3 m	
Categoría de medición	IV 300 V	IV 300 V	IV 300 V	III 300 V	
Protección de ingreso	IP40				
					
	F-1A1 / F-1A / F-1A6	F-2A1 / F-2A / F-2A6	F-3A1 / F-3A / F-3A6	F-2AHD	
	WACEGF1A1OKR WACEGF1AOKR WACEGF1A6OKR	WACEGF2A1OKR WACEGF2AOKR WACEGF2A6OKR	WACEGF3A1OKR WACEGF3AOKR WACEGF3A6OKR	WACEGF2AHDOKR	
				F-3AHD	
				WACEGF3AHDOKR	
Corriente nominal	1500 / 3000 / 6000 A AC	1500 / 3000 / 6000 A AC	1500 / 3000 / 6000 A AC	3000 A AC	
Frecuencia	40 Hz...10 kHz			10 Hz...20 kHz	
Diámetro máx. del conductor medido	380 mm	250 mm	140 mm	290 mm	145 mm
Precisión mínima	1%			0,5%	
Alimentación con baterías	—			—	
Longitud de cable	2,5 m			2,5 m	
Categoría de medición	IV 600 V			IV 600 V	
Protección de ingreso	IP67			IP65	

9 Más información

9.1 Limpieza y mantenimiento

Nota

Se deben utilizar únicamente los métodos de conservación proporcionados por el fabricante en este manual.

La carcasa del analizador puede ser limpiada con un paño suave y humedecido con detergentes comúnmente utilizados. No utilizar disolventes ni productos de limpieza que puedan rayar la carcasa (polvos, pastas, etc.).

Los cables se pueden limpiar con agua y detergentes, luego deben ser secados.

El sistema electrónico del analizador no requiere mantenimiento.

9.2 Almacenamiento

Durante el almacenamiento del dispositivo, hay que seguir las siguientes instrucciones:

- desconectar todos los cables del medidor,
- limpiar bien el medidor y todos los accesorios,
- para evitar la descarga total de las baterías durante el almacenamiento prolongado, las baterías deben ser recargadas periódicamente.

9.3 Desmontaje y utilización

Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos deben ser recogidos por separado, es decir, no se depositan con los residuos de otro tipo.

El dispositivo electrónico debe ser llevado a un punto de recogida conforme con la Ley de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

Antes de llevar el equipo a un punto de recogida no se debe desarmar ninguna parte del equipo.

Hay que seguir las normativas locales en cuanto a la eliminación de envases, pilas usadas y baterías.

9.4 Fabricante

El fabricante del dispositivo que presta el servicio de garantía y postgarantía es:

SONEL S.A.

Wokulskiego 11

58-100 Świdnica

Polonia

tel. +48 74 884 10 53 (Servicio al cliente)

e-mail: customerservice@sonel.com

internet: www.sonel.com

Nota

Para el servicio de reparaciones sólo está autorizado el fabricante.

NOTAS

NOTAS



SONEL S.A.

Wokulskiego 11
58-100 Świdnica
Polonia

Servicio al cliente

tel. +48 74 884 10 53
e-mail: customerservice@sonel.com

www.sonel.com