



CAT

ENG

INTEGRACIÓN DE LAZOS DE CONTROL EN SISTEMAS DE GESTIÓN ENERGÉTICA

Por David Oms Planchart (R&D Product Leader) SALICRU

Introducción

En un mundo marcado por el cambio climático y el aumento constante del consumo energético, la energía solar fotovoltaica emerge como una de las soluciones más potentes y necesarias para encarar los retos del siglo XXI. Esta tecnología, que permite transformar la luz del sol en electricidad de manera eficiente, además de ser una energía limpia e inagotable también se convierte en un elemento clave para impulsar el cambio hacia la transición energética.

En este escenario, de crecimiento exponencial de la generación distribuida y de la demanda eléctrica, hay un elemento fundamental en toda instalación fotovoltaica que toma protagonismo, el gestor energético. Este dispositivo de control actúa como el cerebro de la planta, gestionando el comportamiento mediante métodos de control avanzados para garantizar el cumplimiento de la normativa vigente. Se trata de un dispositivo capaz de analizar, controlar y optimizar en tiempo real el funcionamiento de una o varias unidades de generación (inversores solares), maximizando el rendimiento del autoconsumo y asegurando una integración óptima con la red eléctrica de distribución.

El gestor energético se coloca en su punto de conexión (POCO) de la instalación, donde permite controlar el flujo bidireccional de potencia activa y reactiva P_G de la red de eléctrica mediante la potencia de generación P_{FV} del inversor solar, para ajustarse a las normas de la red teniendo en cuenta el consumo de la instalación P_L .

Este documento expone la recomendación por parte de SALICRU respecto al tipo y sensibilidad de la protección diferencial necesaria en la instalación de sus inversores, y la normativa en que se fundamenta.

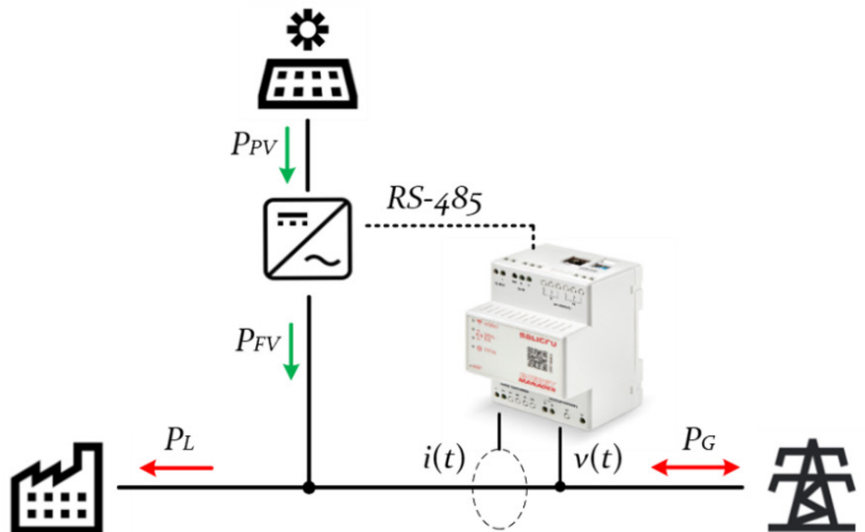


Fig. 1. Diagrama de conexión genérico del gestor energético

Múltiplos sistemas de control en un solo gestor energético

Un sistema de control es una interconexión de componentes que forman una configuración destinada a generar una respuesta deseada. El análisis de estos sistemas se basa principalmente en la teoría de los sistemas lineales, la cual establece una relación de causa y efecto entre sus componentes.

Así, cualquier componente o proceso que se quiera controlar se puede representar mediante un bloque, como se muestra en la Figura 2. La relación entrada-salida expresa la conexión entre la causa (entrada) y el efecto (salida), y refleja el procesamiento que el sistema aplica a la señal de entrada para generar la señal de salida.

Para conseguir que la salida de un sistema siga una respuesta deseada, a menudo se usa un lazo de control, que es un mecanismo fundamental en el control de sistemas. Este lazo utiliza la medida de la salida y su realimentación para compararla con la referencia (la salida esperada), y así generar una acción de control que minimice el error entre las dos.

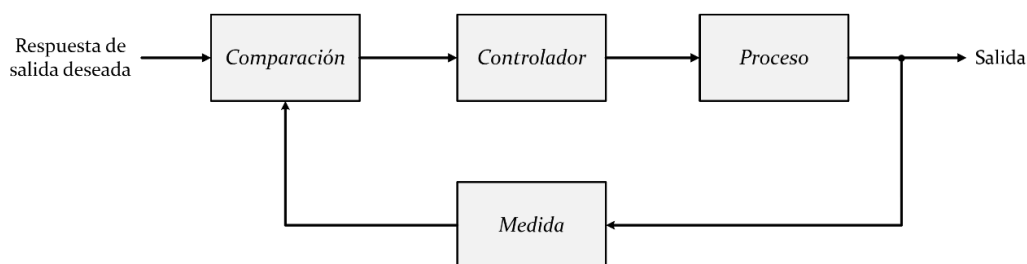


Fig. 2. Sistema de control en lazo cerrado (con retroalimentación)

Respuesta de salida deseada (**Referencia**): Es el valor de consigna que se pretende lograr en la salida del sistema (por ejemplo, la potencia activa de consigna en un inversor solar).

Comparador: Este bloque calcula el error, que es la diferencia entre la referencia y la medida real del sistema.

$$Error = Referencia - Medida \quad (1)$$

Es el punto de inicio del lazo de control, donde se detecta si hay que actuar para corregir la salida.

Controlador: Recibe el error como entrada y genera una señal de control para corregir el comportamiento del sistema. Puede ser un controlador proporcional (P), proporcional-integral (PI), proporcional-integral-derivativo (PID), etc.

Proceso o Planta: Es el sistema físico que queremos controlar (por ejemplo, una caldera, un motor, un equipo de potencia, ...). Recibe la señal de control y produce una salida según su propia dinámica.

Medida: La medida del sistema se denomina señal de realimentación. Este bloque representa el sensor o dispositivo que mide la salida real del sistema para compararla con la respuesta de la salida deseada.

En el campo de la gestión energética, especialmente en entornos con generación distribuida y autoconsumo, la incorporación de múltiples lazos de control dentro de un solo dispositivo es cada vez más necesaria. Un gestor energético moderno puede integrar tres lazos de control independientes pero coordinados para controlar diferentes aspectos críticos del sistema eléctrico:

Lazo de control de Potencia Activa (P-control): regula el flujo de potencia activa para equilibrar la generación y el consumo en tiempo real. Esto permite optimizar el uso de fuentes renovables, reducir la energía importada de la red o exportada en la red, y mantener la frecuencia del sistema dentro de los límites establecidos.

Lazo de control de Sobrevoltaje (U-control): supervisa la tensión del sistema y actúa para evitar valores por encima de los límites admisibles, especialmente en situaciones de generación sobrante (como sucede a mediodía con producción fotovoltaica elevada). Este control protege los equipos y evita desconexiones repentinas por parte de los inversores o del distribuidor.

Lazo de control de Potencia Reactiva (Q-control): ajusta la inyección o consumo de potencia reactiva para mantener la tensión dentro de valores adecuados y optimizar el factor de potencia según la norma asociada. También reduce pérdidas en la red y evita penalizaciones económicas asociadas a un mal ajuste reactivo.

La combinación de estos tres lazos en un solo dispositivo de gestión energética permite una respuesta eficiente, rápida y coordinada ante las fluctuaciones del sistema. Este enfoque permite mejorar tanto la eficiencia como la estabilidad de la instalación, a la vez que asegura el cumplimiento normativo y protege la infraestructura eléctrica. Es, en definitiva, un pilar clave para una transición energética sostenible y segura.

La representación gráfica de este sistema de control multinivel se puede ver en el siguiente esquema (Figura 3). Se definen los tres lazos de control, independientes pero interconectados, todos ejecutados en tiempo real dentro de un microcontrolador con el objetivo de mantener una respuesta rápida y coordinada para garantizar estabilidad y el cumplimiento normativo.

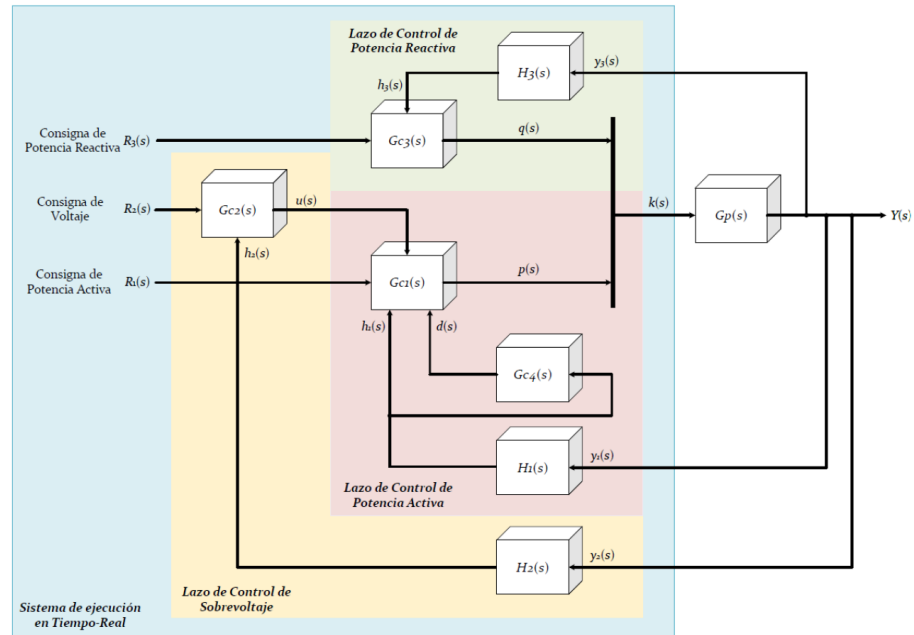


Fig. 3. Diagrama de bloques con la implementación del enfoque multi-lazo

Bloque	Descripción
$G_{c1}(s)$	Controlador de Potencia Activa
$G_{c2}(s)$	Controlador de Sobrevoltaje
$G_{c3}(s)$	Controlador de Potencia Reactiva
$G_{c4}(s)$	Controlador Anticipativo
$H_1(s)$	Medida de la Potencia Activa
$H_2(s)$	Medida de Voltaje
$H_3(s)$	Medida de la Potencia Reactiva
$G_p(s)$	Proceso / Planta

El sistema tiene como objetivo principal controlar la potencia activa y reactiva intercambiada con la red eléctrica y manteniendo las sobretensiones dentro de los límites admisibles para asegurar la estabilidad y la calidad del suministro. Estos tres objetivos se cumplen mediante tres lazos de control cerrados representados con los siguientes bloques:

P-control: $G_{c1}(s)$, $G_{c4}(s)$ y $H_1(s)$

U-control: $G_{c2}(s)$ y $H_2(s)$

Q-control: $G_{c3}(s)$ y $H_3(s)$

Los tres actúan sobre un proceso común representado por $G_p(s)$, pero cada uno regula una magnitud diferente. Estas magnitudes son transformadas en las señales de entrada del proceso: $p(s)$ y $q(s)$, que se combinan para formar $k(s)$, la señal total de actuación sobre la planta. Las señales de referencia $R_1(s)$, $R_2(s)$ y $R_3(s)$ corresponden a las consignas de cada controlador, y $Y(s)$ representa la salida global del sistema como respuesta agregada de los tres lazos de control.

A continuación, se presenta una mesa comparativa de los múltiples lazos de control, donde se destacan sus funciones en la gestión energética, los objetivos principales y las estrategias de control asociadas.

Aspecto	Control de Potencia Activa	Control de Sobrevoltaje	Control de Potencia Reactiva
Variable regulada	Potencia activa P (kW)	Potencia activa P (kW)	Potencia reactiva Q (kVAr)
Objeto principal	Optimizar el autoconsumo y el balance energético	Prevenir sobretensiones locales y mejora la estabilidad de la red eléctrica	Mantener unitario el factor de potencia y los niveles de tensión dentro de los márgenes operativos
Actuación típica	Modulación de la generación del equipo	Reducción de P según el voltaje de red	Inyectar/Absorber Q según el factor de potencia y voltaje
Tipos de regulación	Control PI + Control anticipativo	Control PI	Control PI
Entrada principal	Medida de potencia activa P a 4 cuadrantes	Medida de voltaje	Medida de potencia reactiva Q a 4 cuadrantes
Respuesta Dinámica	Rápida	Lenta	Lenta
Modos de seguimiento en función de la señal	- Fase de máximo consumo activo - Fase de mínimo consumo activo - Consum activo promedio de las fases	- Fase de máximo voltaje - Fase de mínimo voltaje - Voltaje promedio de las fases	- Fase de máximo consumo reactivo - Fase de mínimo consumo reactivo - Consum reactivo promedio de las fases - Consumo reactivo por fases independientes
Impacto sobre la red	Mejora la estabilidad de flujos de potencia	Reduce riesgos de sobrecarga o daños en equipos	Mejora la calidad de la red y reduce penalizaciones
¿Requerido por normativa?	Si, UNE 217001:2020	No	Si, UE 2016/631

Lazo de Control de Potencia Activa (P-control)

Este lazo se encarga de regular la cantidad de energía activa consumida (importación) o inyectada (exportación) en la red eléctrica manteniendo el equilibrio entre la potencia de generación de los inversores solares y la demanda del sistema. Este esquema refleja un sistema de control en tiempo real implementado, por ejemplo, en un microcontrolador para controlar la potencia activa intercambiada con la red eléctrica.

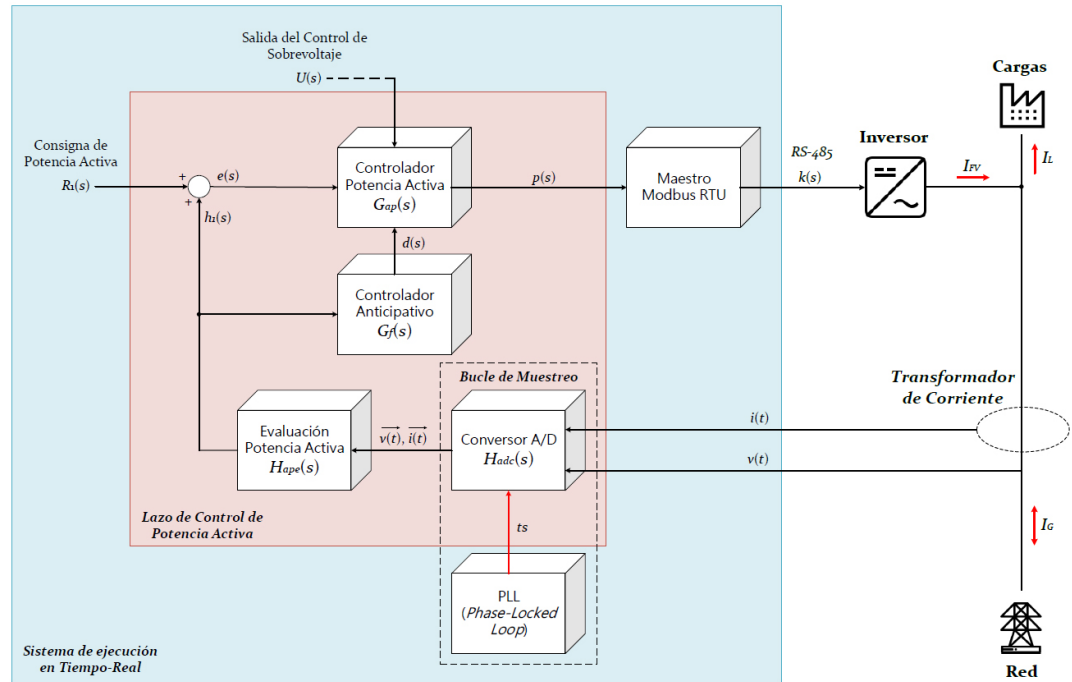


Fig. 4. Sistema de Control de Potencia Activa

Controlador Potencia Activa - $G_{ap}(s)$

Es el núcleo del lazo de control, y es el que recibe como entrada la señal de error

$$e(s) = R_1(s) - h_1(s) \quad (2)$$

dónde:

$R_1(s)$ es el valor de referencia de la potencia activa.

$h_1(s)$ es la señal del valor calculado de la potencia activa.

Su salida es $p(s)$, la señal de control que se transformará en un comando para el inversor. La función de transferencia del controlador PI:

$$G_{ap}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3)$$

Controlador Anticipativo o Feedforward - $G_f(s)$

Se encarga de compensar las dinámicas del sistema agregando una acción anticipada. Recibe la señal de potencia calculada $h_1(s)$ y genera una acción $d(s)$ para ayudar al controlador principal. Su salida se suma a $G_{ap}(s)$ para

generar la señal equivalente $p(s)$. La función de transferencia es proporcional:

$$G_f(s) = K_f \quad (4)$$

Avaluación Potencia Activa - $H_{ape}(s)$

Procesa las medidas de tensión $v(t)$ y corriente $i(t)$, calcula la potencia activa, y aplica el modo de seguimiento arrojando la señal $h_1(s)$. Se basa en la fórmula:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v_i(t) \cdot i_i(t) dt \quad (5)$$

dónde:

$v_i(t) \cdot i_i(t)$ es la potencia instantánea.

T es el periodo de tiempo de muestreo.

Convertor A/D - $H_{adc}(s)$

Digitaliza las medidas de entradas analógicas de tensión y corriente. Tiene un retardo medio asociado t_s , en el dominio de Laplace, típico de la discretización de un sistema en tiempo continuo:

$$H_{adc}(s) = e^{-t_s(s)} \quad (6)$$

PLL (Phase Locked Loop)

Sincroniza el sistema con la fase de la red y proporciona la referencia de fase necesaria para el cálculo de potencia activa y detección de componentes fundamentales.

Maestro Modbus RTU i Inversor (Planta)

La señal $p(s)$ se transmite como comanda $k(s)$ hacia el inversor mediante una interfaz RS-485 y un protocolo Modbus RTU. El inversor modula la potencia generada. Dónde la ecuación de la salida $p(t)$, del Controlador PI + Controlador anticipativo (*Feedforward*) en el dominio del tiempo, tal como se utiliza al lazo de control de potencia activa:

$$p(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_f \cdot h_1(t) \quad (7)$$

donde:

Los dos primeros términos son la corrección PI sobre el error.

El tercer término es la acción anticipada basada en la medida directa de la salida, para mejorar la respuesta y reducir el retraso. La señal de salida del control anticipativo:

$$d(t) = K_f \cdot h_1(t) \quad (8)$$

La salida modificada del bloque $G_{ap}(s)$:

$$p(t) = \begin{cases} u(t) & \text{si } p(t) \geq u(t), \\ p(t) & \text{si } p_{\min}(t) < p(t) < u(t), \\ p_{\min}(t) & \text{si } p(t) \leq p_{\min}(t) \end{cases} \quad (9)$$

$u(t)$ es la señal de salida del bloque $G_{c2}(s)$.

La esencia de este lazo de control yace en su capacidad de adaptación para gestionar un proceso o planta con dos respuestas temporales muy diferentes:

- Cuando el actuador aumenta la potencia de generación (respuesta lenta).
- Cuando el actuador disminuye la potencia de generación (respuesta rápida).

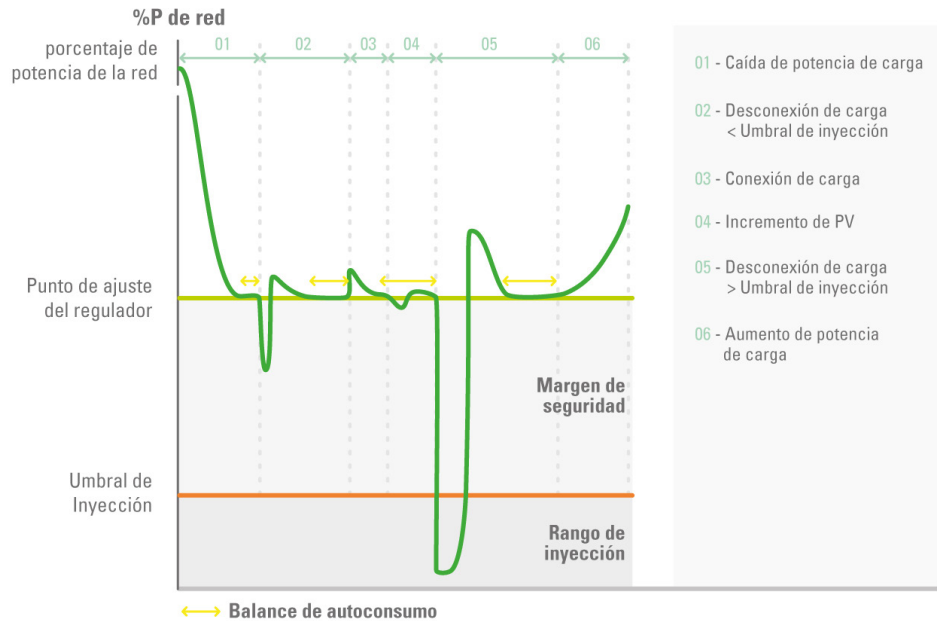


Fig. 5. Respuesta dinámica del P-control sujeto a múltiples variaciones de carga.

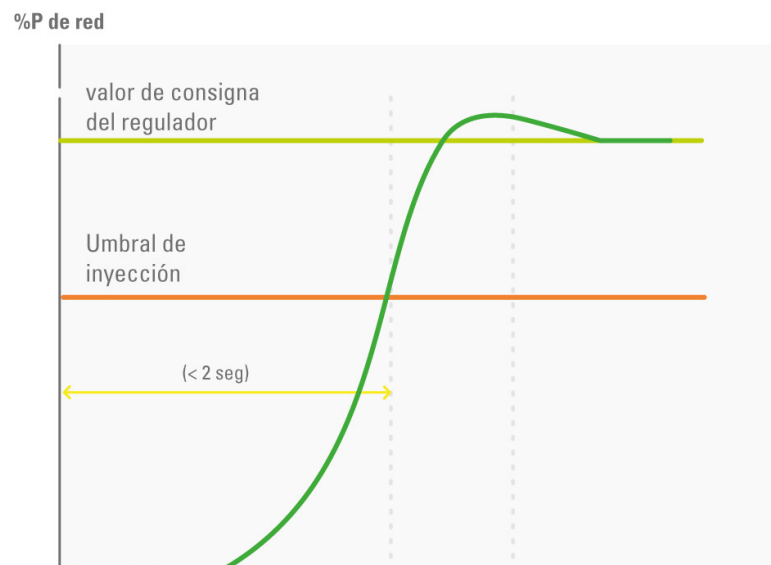


Fig. 6. Respuesta transitoria del P-control a una desconexión súbita de carga.

Para maximizar el rendimiento del equipo de potencia ante perturbaciones del sistema, se implementa un control anticipativo (Feedforward) como respuesta rápida del controlador principal. Este controlador permite adaptar la respuesta del lazo, actuando de manera eficiente ante múltiples variables externas al sistema, como por ejemplo variaciones rápidas de carga, aumentos repentinos de la irradiancia solar o fluctuaciones de la red eléctrica.

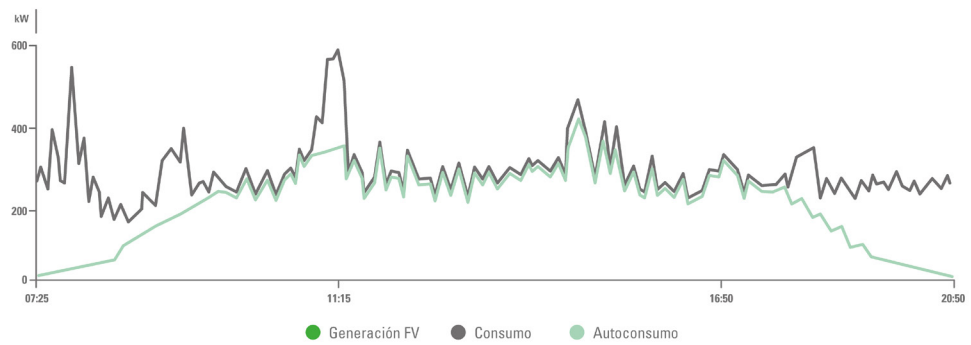


Fig. 7. Curvas de potencia de una instalación solar con el P-control activado (Consigna de Potencia Activa = 0)

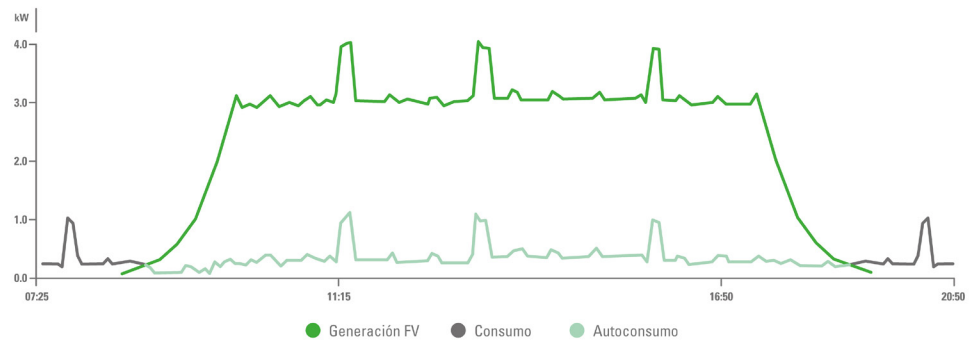


Fig. 8. Curvas de potencia de una instalación solar con el P-control activado (Consigna de Potencia Activa > 0)

Lazo de Control de Sobrevoltaje (U-control)

Cuando la generación fotovoltaica es muy elevada (por ejemplo, en días asoleados con baja demanda local), se puede producir un incremento de la tensión en su punto de conexión debido principalmente a efectos relacionados con el balance entre generación y consumo y las características de la red eléctrica. El gestor energético, mediante un algoritmo de control que regula continuamente la generación de potencia, actúa para evitar que se superen los límites de tensión admisibles. Este mecanismo se conoce como Lazo de Control de Sobrevoltaje, y reduce progresivamente la potencia activa inyectada cuando la tensión supera el umbral establecido $R_2(s)$, evitando así, desconexiones repentinas y manteniendo la planta conectada ante variaciones puntuales de la red.

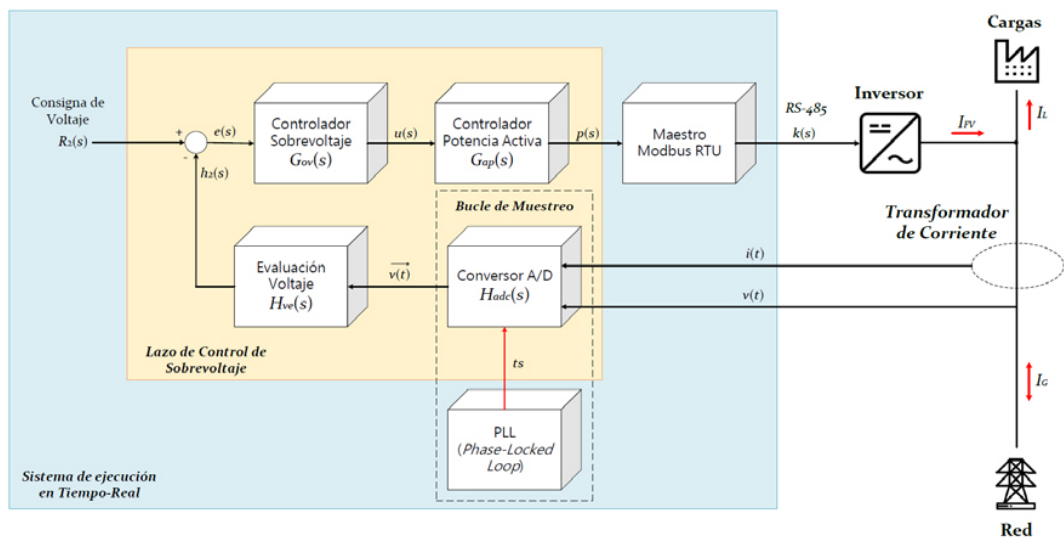


Fig. 9. Sistema de Control de Sobrevoltaje

Controlador Sobrevoltaje - $G_{ov}(s)$

Es el núcleo del lazo de control, y es el que recibe como entrada la señal de error

$$e(s) = R_2(s) - h_2(s) \quad (10)$$

dónde:

$R_2(s)$ es el valor de referencia del voltaje umbral.

$h_2(s)$ es la señal del valor de voltaje calculado.

Su salida es $u(s)$, a señal de control que se enviará al bloque de control $G_{ap}(s)$.

La función de transferencia del controlador PI:

$$G_{ov}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (11)$$

Dónde la ecuación de la salida $u(t)$, del Controlador PI en el dominio del tiempo, tal como se utiliza al lazo de control de sobrevoltaje:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (12)$$

Ambos términos son la corrección PI sobre el error.

Evaluación Voltaje - $H_{ve}(s)$

Procesa la medida de tensión $v(t)$ eficaz y aplica el modo de seguimiento, arrojando la señal $H_2(s)$.

Se basa en la fórmula:

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_i^2(t) dt} \quad (13)$$

dónde:

$v_i(t)$ es el voltaje instantáneo.

T es el periodo de tiempo de muestreo.

Convertor A/D - $H_{adc}(s)$

Digitaliza las medidas de entradas analógicas de tensión y corriente. Tiene un retardo medio asociado t_s en el dominio de Laplace, típico de la discretización de un sistema en tiempo continuo:

$$H_{adc}(s) = e^{-t_s(s)} \quad (14)$$

PLL (Phase Locked Loop)

Sincroniza el sistema con la fase de la red y proporciona la referencia de fase necesaria para el cálculo de voltaje eficaz y detección de componentes fundamentales.

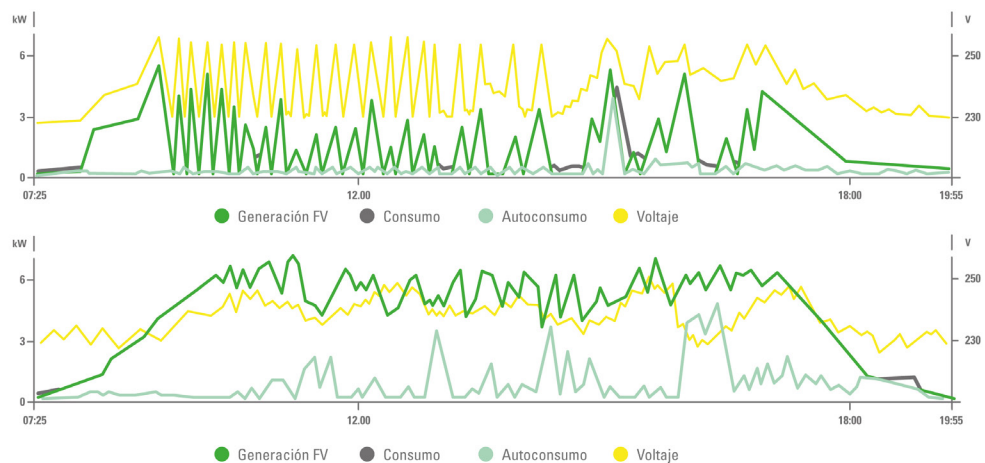


Fig. 10. Comparativa de curvas de potencia y fluctuación de la tensión en una instalación solar con el U-control desactivado (imagen superior) y activado (imagen inferior)

Este sistema de control resulta especialmente relevante en instalaciones conectadas a redes de distribución débiles, donde las fluctuaciones de tensión son más frecuentes. El lazo de control acontece clave para proteger la instalación y garantizar la estabilidad del sistema eléctrico.

Lazo de Control de Potencia Reactiva (Q-control)

El control de la potencia reactiva es un elemento clave para garantizar la estabilidad, la eficiencia y la calidad del suministro eléctrico. En un sistema de potencia, la potencia reactiva no produce trabajo útil, pero es esencial para mantener los niveles de tensión dentro de los márgenes operativos y asegurar el funcionamiento correcto de los equipos eléctricos.

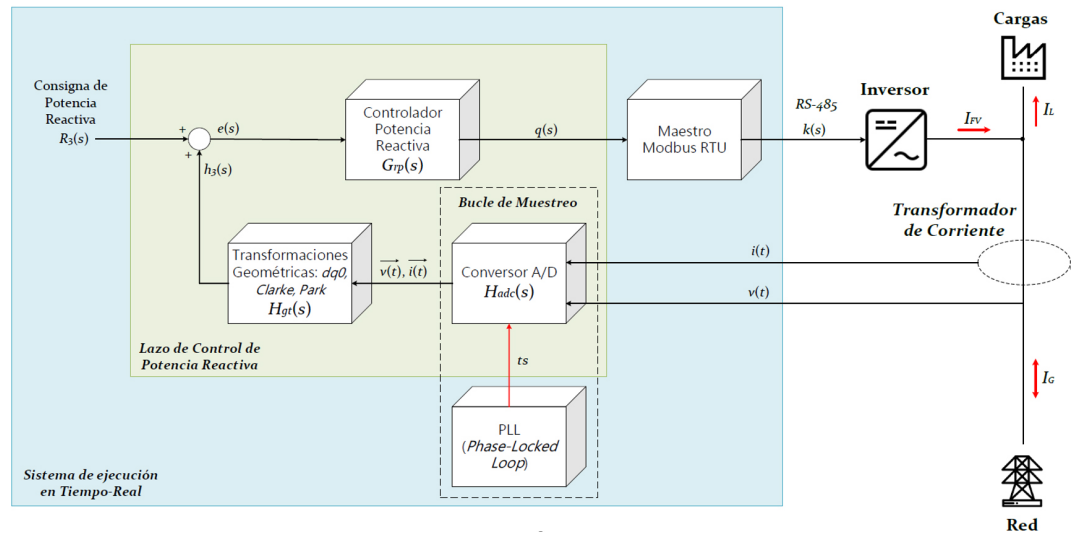


Fig. 11. Sistema de Control de Potencia Reactiva

Controlador Potencia Reactiva - $G_{rp}(s)$

Es el núcleo del lazo de control, y es el que recibe como entrada la señal de error

$$e(s) = R_3(s) - h_3(s) \quad (15)$$

dónde:

$R_3(s)$ es el valor de referencia de la potencia reactiva.

$h_3(s)$ es la señal del valor calculado de la potencia reactiva.

Su salida es $q(s)$, la señal de control que se transformará en un comando para el inversor. La función de transferencia del controlador PI:

$$G_{rp}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (16)$$

Transformados Geométricas: $dq0$, Clarke, Park - $H_{gt}(s)$

Procesa las medidas de tensión $v(t)$ y corriente $i(t)$, calcula la potencia reactiva utilizando las transformaciones geométricas, y aplica el modo de seguimiento arrojando la señal $h_3(s)$:

Transformada de Clarke La transformación de Clarke convierte las tensiones/corrientes trifásicas (a, b, c) en componentes ortogonales estacionarias ($\alpha, \beta, 0$):

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (18)$$

dónde:

v_a, v_b, v_c són las tensiones de fase instantáneas.

i_a, i_b, i_c són las corrientes de fase instantáneas.

v_α, v_β, v_0 y i_α, i_β, i_0 són las componentes ortogonales estacionarias ($\alpha, \beta, 0$) de las tensiones y de las corrientes.

Interpretación geométrica:

α y β forman un sistema de coordenadas ortogonal en el plano complejo, v_0 y i_0 son las componentes homopolares (cero en sistemas equilibrados).

Transformada de Park

La transformación de Park convierte los componentes $\alpha \beta$ en un sistema de referencia rotativo ($d, q, 0$) sincronizado con la red eléctrica, a velocidad ω , mediante el bloque PLL. La transformación de Clarke convierte las tensiones/corrientes trifásicas (a, b, c) en componentes ortogonales estacionarias ($\alpha, \beta, 0$):

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

dónde:

$\theta = \omega t$ es el ángulo de rotación del sistema.

Interpretación geométrica:

v_d, v_q y i_d, i_q son componentes en ejes ortogonales rotativos i en régimen permanente:

v_d, v_q son constantes.

En el sistema $dq0$.

La potencia reactiva es calculada como:

$$Q = \frac{3}{2}(v_q i_d - v_d i_q) \quad (21)$$

Interpretación geométrica: Q depende de la diferencia entre los productos cruzados de las componentes dq .

Si v_d es la componente principal (eje directo alineado con la tensión), entonces, i_q contribuye a la potencia reactiva.

Convertor A/D - $H_{adc}(s)$

Digitaliza las medidas de entradas analógicas de tensión y corriente.

Tiene un retardo medio asociado t_s , en el dominio de Laplace, típico de la discretización de un sistema en tiempo continuo:

$$H_{adc}(s) = e^{-t_s(s)} \quad (22)$$

PLL (Phase Locked Loop)

Sincroniza el sistema con la fase de la red y proporciona la referencia de fase necesaria para el cálculo de potencia reactiva y detección de componentes fundamentales.

Maestro Modbus RTU y Inversor (Planta)

La señal $q(s)$ se transmite como comanda $k(s)$ hacia el inversor mediante una interfaz RS-485 y un protocolo Modbus RTU. El inversor modula la potencia reactiva generada.

Dónde la ecuación de la salida $q(t)$, del Controlador PI en el dominio del tiempo, tal como se utiliza al lazo de control de potencia reactiva:

$$q(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (23)$$

Ambos términos son la corrección PI sobre el error.

Control de potencia reactiva y gestión avanzada de perfiles $U-Q/P_{max}$

El control de potencia reactiva incorpora la capacidad de gestionar activamente los perfiles de las curvas $U-Q/P_{max}$, mediante el ajuste dinámico de la señal de consigna $R_3(s)$, de acuerdo con los criterios técnicos definidos por el Reglamento (UE) 2016/631 sobre la conexión de generadores a la red.

El perfil de respuesta de potencia reactiva Q en porcentaje de la potencia activa máxima del sistema de generación solar P_{max} , se muestra a la Figura 12. Este gráfico ilustra como el sistema reacciona ante sobretensiones ($U/U_n > 1 pu$) o subtensiones ($U/U_n < 1 pu$) expresados con valores unitarios (pu) respecto el voltaje nominal U_n .

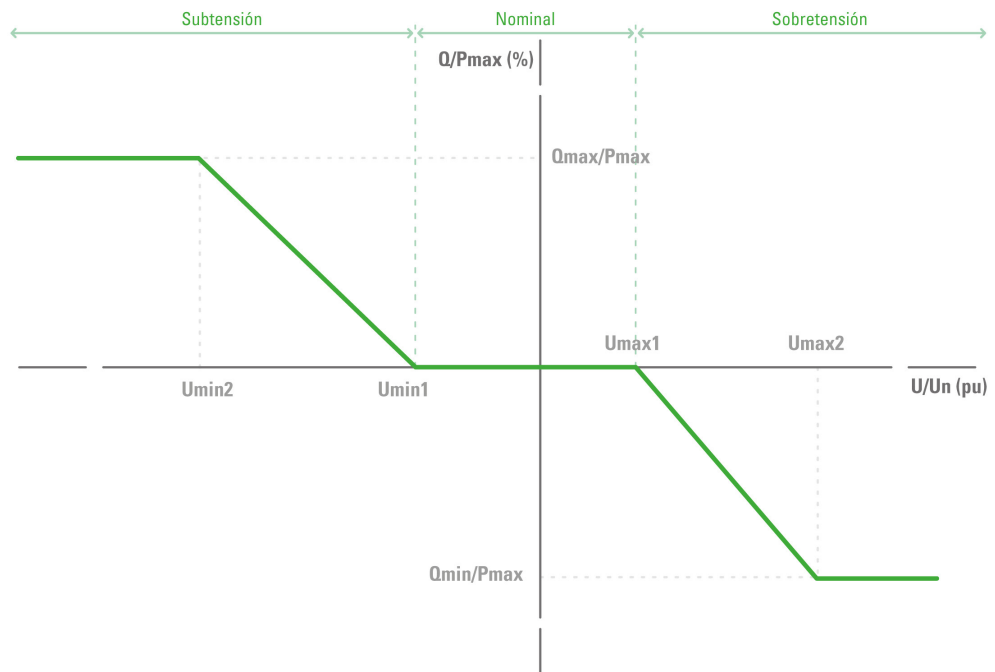


Fig. 12. Inyección/Absorción de potencia reactiva requerida en función del valor de tensión al punto de conexión del sistema de generación

dónde los umbrales ajustables son:

U_{min2} : Límite de emergencia para subtensiones extremas.

U_{min1} : Límite inferior para activar la inyección de reactiva.

U_{max1} : Límite superior para activar la absorción de reactiva.

U_{max2} : Límite de emergencia para sobretensiones extremas.

Q_{max}/P_{max} : Límite de la capacidad para producir potencia activa (capacitivo).

Q_{min}/P_{max} : Límite de la capacidad para consumir potencia activa (inductivo).

Zona de operación	Rango	Respuesta
Nominal	$U_{min1} \leq U/U_n \leq U_{max1}$	El sistema no actúa ($Q = 0$)
Sobretensión	$U_{max1} < U/U_n \leq U_{max2}$ o $U/U_n > U_{max2}$	El sistema absorbe reactiva (valores negativos de Q/P_{max}) para reducir la tensión
Subtensión	$U_{min2} \leq U/U_n < U_{min1}$ o $U/U_n < U_{min2}$	El sistema inyecta reactiva (valores positivos de Q/P_{max}) para elevar la tensión

Mediante el lazo de control de potencia reactiva (Q-control), el sistema es capaz de monitorizar en tiempo real las condiciones de la red y actuar dinámicamente sobre los inversores fotovoltaicos que disponen de capacidad de regulación de potencia reactiva. Este control, combinado con el gestor de perfiles $U-Q/P_{max}$, permite:

- Inyectar o absorber potencia reactiva de forma automática, estabilizando la tensión en puntos críticos de la red.
- Adaptarse a los requisitos específicos del operador de red, como por ejemplo curvas características $P(f)$, $Q(V)$ u otras especificaciones definidas en los códigos de red.
- Mejorar el factor de potencia global del sistema, reduciendo las pérdidas por efecto Joule y liberando capacidad en líneas y transformadores.
- Evitar penalizaciones económicas asociadas al consumo excesivo de energía reactiva, habitualmente impuestas por las compañías distribuidoras.
- Contribuir a la estabilidad de la red ante fluctuaciones de carga, conexiones o desconexiones repentinas y variabilidad de la generación renovable.

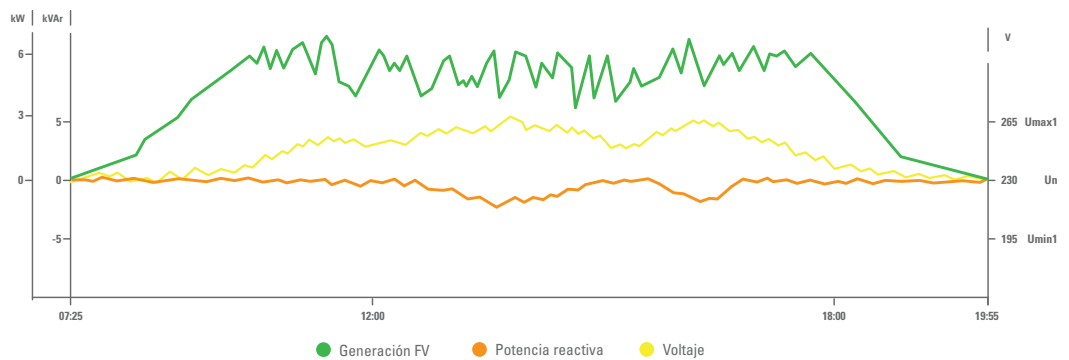


Fig. 13. Curva de potencia reactiva de una instalación solar con el Q-control activado

Las penalizaciones por consumo de energía reactiva se originan por el hecho que esta energía, a pesar de ser necesaria para el funcionamiento de ciertos equipos, no realiza trabajo útil, pero sí que satura la capacidad de transporte de las líneas y transformadores, incrementando las pérdidas y disminuyendo la eficiencia general del sistema eléctrico.

Conclusiones

La integración de múltiples lazos de control en un único gestor energético representa un adelanto fundamental en la gestión eficiente de instalaciones solares fotovoltaicas. A través de los lazos de potencia activa (P-control), sobre-tensión (U-control) y potencia reactiva (Q-control), el sistema proporciona una respuesta dinámica alineada con los requisitos normativos de la red eléctrica. El gestor energético se encarga de analizar, controlar y optimizar en tiempo real el funcionamiento de uno o varios inversores solares, maximizando el rendimiento del autoconsumo y garantizando la integración óptima con la red de distribución. Este enfoque de control coordinado permite:

- Optimizar el autoconsumo, reduciendo la dependencia de la red y mejorando la eficiencia energética.
- Evitar riesgos operativos, como sobretensiones o desequilibrios, mejorando la estabilidad y la calidad de la red.
- Adaptarse a los requisitos normativos, como los definidos al Reglamento (UE) 2016/631 y a la UNE 217001:2020.
- Reducir costes y penalizaciones asociados al consumo de energía reactiva y a un mal factor de potencia.
- Mejorar la resiliencia del sistema ante fluctuaciones de carga y variabilidad de la generación renovable.

En definitiva, la incorporación de un sistema de control multinivel dentro de un gestor energético avanzado convierte la planta fotovoltaica en un elemento activo y preparado para afrontar los desafíos del modelo energético del futuro, cada vez con más presencia de energías renovables.

Referencias

- [1] Albert MARZÀBAL, Josep M. GUERRERO and Juan C. VASQUEZ. EL MÉTODO «DROOP» MÁS ALLÁ DEL SIMPLE PARALELADO DE SAIS. SALICRU whitepapers, 2017. Biblioteca privada de Salicru.
- [2] C. DORF, Richard and H. BISHOP, Robert. Sistema de Control Moderno. 6185,5. 10ª Edición. Madrid: PEARSON EDUCATION, 2005. p. 1-70, 72-80. ISBN núm. 84-205-4401-9.
- [3] A. BAHÓN, Cecilio and R. GINER, Cristóbal. Tecnología de sistemas de control. 1ª Edición. Barcelona: Ediciones UPC, 2004. p. 41-80. ISBN núm. 84-8301-778-4.
- [4] O'ROURKE, COLM J. et al. A Geometric Interpretation of Reference Frames and Transformations: dq0, Clarke, and Park. IEEE Transactions on Energy Conversion 34, 4 (December 2019): 2070 - 2083 © 2019 IEEE. MIT Open Access Articles.
- [5] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN I CERTIFICACIÓN. Ensayos para sistemas que eviten el vertido de energía a la red de distribución. UNE 217001:2020. Madrid: AENOR, 2020. Biblioteca privada de Salicru.
- [6] DIARIO OFICIAL DE LA UNION EUROPEA. Establece un código de red sobre requisitos de conexión de generadores a la red. UE 2016/631 de 14 abril de 2016. Comisión Europea. Biblioteca privada de Salicru.



ES

ENG

INTEGRACIÓ DE LLAÇOS DE CONTROL EN SISTEMES DE GESTIÓ ENERGÈTICA

Per David Oms Planchart (R&D Product Leader) SALICRU

Introducció

En un món marcat pel canvi climàtic i l'augment constant del consum energètic, l'energia solar fotovoltaica emergeix com una de les solucions més potents i necessàries per encarar els reptes del segle XXI. Aquesta tecnologia, que permet transformar la llum del sol en electricitat de manera eficient, a banda de ser una energia neta i inesgotable també és converteix en un element clau per impulsar el canvi cap a la transició energètica.

En aquest escenari, de creixement exponencial de la generació distribuïda i de la demanda elèctrica, hi ha un element fonamental en tota instal·lació fotovoltaica que pren protagonisme, el gestor energètic. Aquest dispositiu de control actua com el cervell de la planta, gestionant-ne el comportament mitjançant mètodes de control avançats per garantir el compliment de la normativa vigent.

El gestor energètic es col·loca al punt de connexió (POC) de la instal·lació, on permet controlar el flux bidireccional de potència activa i reactiva P_G de la xarxa de elèctrica mitjançant la potència de generació P_{FV} de l'inversor solar, per ajustar-se a les normes de la xarxa tenint en compte el consum de la instal·lació P_L .

Aquest document exposa la recomanació per part de SALICRU respecte al tipus i la sensibilitat de la protecció diferencial necessària en la instal·lació dels seus inversors, i la normativa en què es fonamenta.

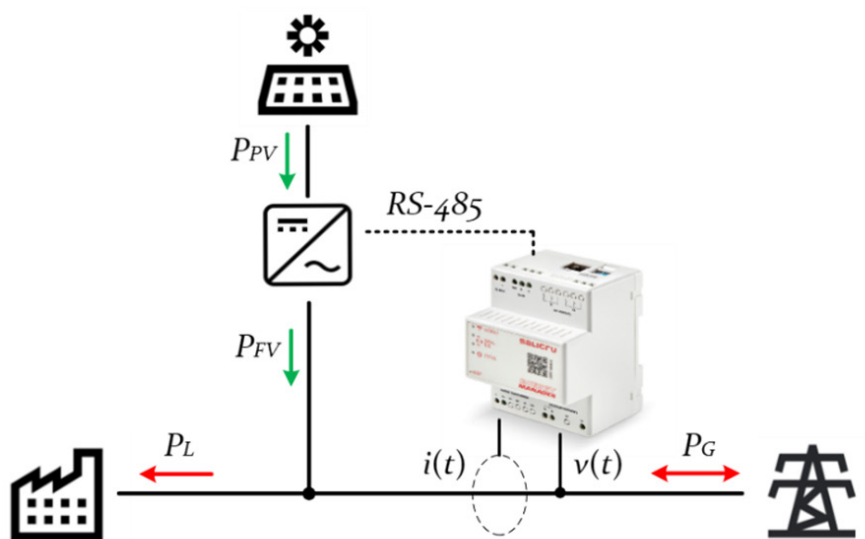


Fig. 1. Diagrama de connexió genèric del gestor energètic

Múltiplos sistemas de control en un solo gestor energético

Un sistema de control és una interconnexió de components que formen una configuració destinada a generar una resposta desitjada. L'anàlisi d'aquests sistemes es basa principalment en la teoria dels sistemes lineals, la qual estableix una relació de causa i efecte entre els components.

Així, qualsevol component o procés que es vulgui controlar es pot representar mitjançant un bloc, com es mostra a la Figura 2. La relació entrada-sortida expressa la connexió entre la causa (entrada) i l'efecte (sortida), i reflecteix el processament que el sistema aplica al senyal d'entrada per generar el senyal de sortida.

Per tal d'aconseguir que la sortida d'un sistema segueixi una resposta desitjada, sovint es fa servir un llaç de control, que és un mecanisme fonamental en el control de sistemes. Aquest llaç utilitza la mesura de la sortida i la seva realimentació per comparar-la amb la referència (la sortida esperada), i així generar una acció de control que minimitzi l'error entre totes dues.

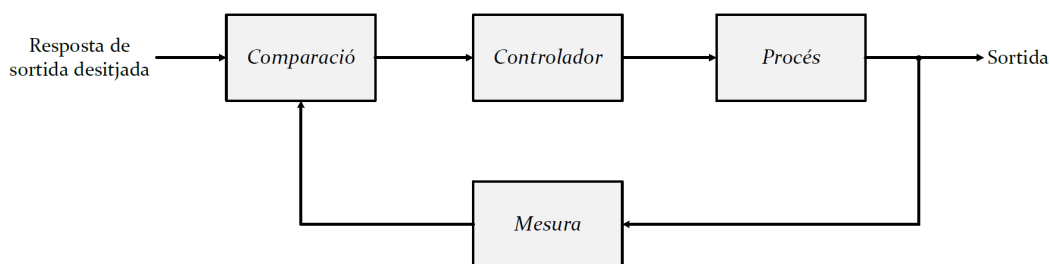


Fig. 2. Sistema de control en llaç tancat (amb retroalimentació)

Resposta de sortida desitjada (**Referència**): És el valor de consigna que es pretén assolir a la sortida del sistema (per exemple, la potència activa de consigna en un inversor solar).

Comparador: Aquest bloc calcula l'error, que és la diferència entre la referència i la mesura real del sistema.

$$Error = Referencia - Medida \quad (1)$$

És el punt d'inici del llaç de control, on es detecta si cal actuar per corregir la sortida.

Controlador: Rep l'error com a entrada i genera un senyal de control per corregir el comportament del sistema. Pot ser un controlador proporcional (P), proporcional-integral (PI), proporcional-integral-derivatiu (PID), etc.

Proceso o Planta: És el sistema físic que volem controlar (per exemple, una caldera, un motor, un equip de potència,...). Rep el senyal de control i produeix una sortida (output) segons la seva dinàmica pròpia.

Medida: La mesura del sistema es denomina senyal de realimentació. Aquest bloc representa el sensor o dispositiu que mesura la sortida real del sistema per comparar-la amb la resposta de la sortida desitjada.

En el camp de la gestió energètica, especialment en entorns amb generació distribuïda i autoconsum, la incorporació de múltiples llaços de control dins d'un sol dispositiu és cada cop més necessària. Un gestor energètic modern pot integrar tres llaços de control independents però coordinats per controlar diferents aspectes crítics del sistema elèctric:

Llaç de control de Potència Activa (P-control): regula el flux de potència activa per equilibrar la generació i el consum en temps real. Això permet optimitzar l'ús de fonts renovables, reduir l'energia importada de la xarxa o exportada a la xarxa, i mantenir la freqüència del sistema dins dels límits establerts.

Llaç de control de Sobrevoltatge (U-control): supervisa la tensió del sistema i actua per evitar valors per sobre dels límits admissibles, especialment en situacions de generació sobrant (com succeeix al migdia amb producció fotovoltaica elevada). Aquest control protegeix els equips i evita desconnexions sobtades per part dels inversors o del distribuïdor.

Llaç de control de Potència Reactiva (Q-control): ajusta la injecció o consum de potència reactiva per mantenir la tensió dins de valors adequats i optimitzar el factor de potència segons la norma associada. També redueix pèrdues a la xarxa i evita penalitzacions econòmiques associades a un mal ajust reactiu.

La combinació d'aquests tres llaços en un sol dispositiu de gestió energètica permet una resposta eficient, ràpida i coordinada davant les fluctuacions del sistema. Aquest enfocament permet millorar tant l'eficiència com l'estabilitat de la instal·lació, alhora que assegura el compliment normatiu i protegeix la infraestructura elèctrica. És, en definitiva, un pilar clau per a una transició energètica sostenible i segura.

La representació gràfica d'aquest sistema de control multinivell es pot veure en el següent esquema (Figura 3). S'hi defineixen els tres llaços de control, independents però interconnectats, tots executats en temps real dins d'un microcontrolador amb l'objectiu de mantenir una resposta ràpida i coordinada per garantir estabilitat i el compliment normatiu.

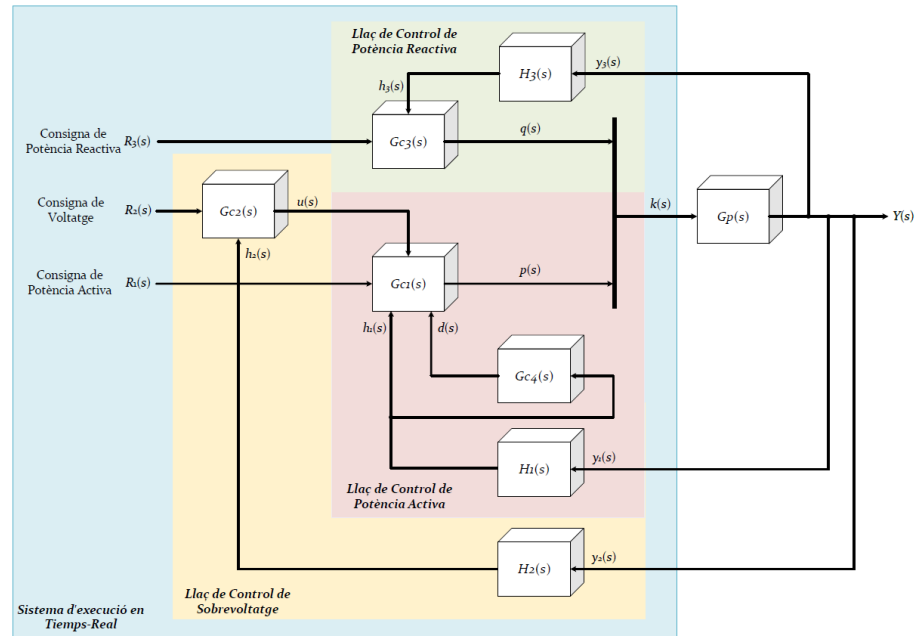


Fig. 3. Diagrama de blocs amb la implementació de l'enfocament multillaç

Bloque	Descripción
$G_{c1}(s)$	Controlador de Potència Activa
$G_{c2}(s)$	Controlador de Sobrevoltatge
$G_{c3}(s)$	Controlador de Potència Reactiva
$G_{c4}(s)$	Controlador Anticipatiu
$H_1(s)$	Mesura de la Potència Activa
$H_2(s)$	Mesura del Voltatge
$H_3(s)$	Mesura de la Potència Reactiva
$G_p(s)$	Procés / Planta

El sistema té com a objectiu principal controlar la potència activa i reactiva intercanviada amb la xarxa elèctrica i mantenint les sobretensions dins dels límits admissibles per assegurar l'estabilitat i la qualitat del subministrament. Aquests tres objectius es compleixen mitjançant tres llaços de control tancats representats amb els següents blocs:

P-control: $G_{c1}(s)$, $G_{c4}(s)$ i $H_1(s)$

U-control: $G_{c2}(s)$ i $H_2(s)$

Q-control: $G_{c3}(s)$ i $H_3(s)$

Tots tres actuen sobre un procés comú representat per $G_p(s)$, però cadascun regula una magnitud diferent. Aquestes magnituds són transformades en els senyals d'entrada del procés: $p(s)$ i $q(s)$, que es combinen per formar $k(s)$, el

senyal total d'actuació sobre la planta. Els senyals de referència $R_1(s)$, $R_2(s)$ i $R_3(s)$ corresponen a les consignes de cada controlador, i $Y(s)$ representa la sortida global del sistema com a resposta agregada dels tres llaços de control.

A continuació, es presenta una taula comparativa dels múltiples llaços de control, on es destaquen les seves funcions en la gestió energètica, els objectius principals i les estratègies de control associades.

Aspecte	Control de	Control de Sobrevoltaje	Control de Potencia Reactiva
Variable regulada	Potència activa P (kW)	Potència activa P (kW)	Potència reactiva Q (kVAr)
Objectiu principal	Optimitzar l'autoconsum i el balanç energètic	Prevenir sobretensions locals i millora la estabilitat de la xarxa elèctrica	Mantenir unitari el factor de potència i els nivells de tensió dins dels marges operatius
Actuació típica	Modulació de la generació de l'equip	Reducció de P segons el voltatge de xarxa	Injectar/Absorbir Q segons el factor de potència i voltatge
Tipus de regulació	Control PI + Control anticipatiu	Control PI	Control PI
Entrada principal	Mesura de potència activa P a 4 quadrants	Mesura del voltatge	Mesura de potència reactiva Q a 4 quadrants
Resposta Dinàmica	Ràpida	Lenta	Lenta
Modes de seguiment en funció del senyal	- Línia de màxim consum - Línia de mínim consum - Consum mitjà de les línies	- Línia de màxim voltatge - Línia de mínim voltatge - Voltatge mitjà de les línies	- Línia de màxim consum reactiu - Línia de mínim consum reactiu - Consum reactiu mitjà de les línies - Consums reactiu per línies independents
Impacte sobre la xarxa	Millora l'estabilitat de fluxos de potència	Redueix riscos de sobrecàrrega o danys en equips	Millora la qualitat de la xarxa i redueix penalitzacions
Requerit per normativa?	Sí, UNE 217001:2020	No	Sí, UE 2016/631

Llaç de Control de Potència Activa (P-control)

Aquest llaç s'encarrega de regular la quantitat d'energia activa consumida (importació) o injectada (exportació) a la xarxa elèctrica mantenint l'equilibri entre la potència de generació dels inversors solars i la demanda del sistema. Aquest esquema reflecteix un sistema de control en temps real implementat, per exemple, en un microcontrolador per controlar la potència activa intercanviada amb la xarxa elèctrica.

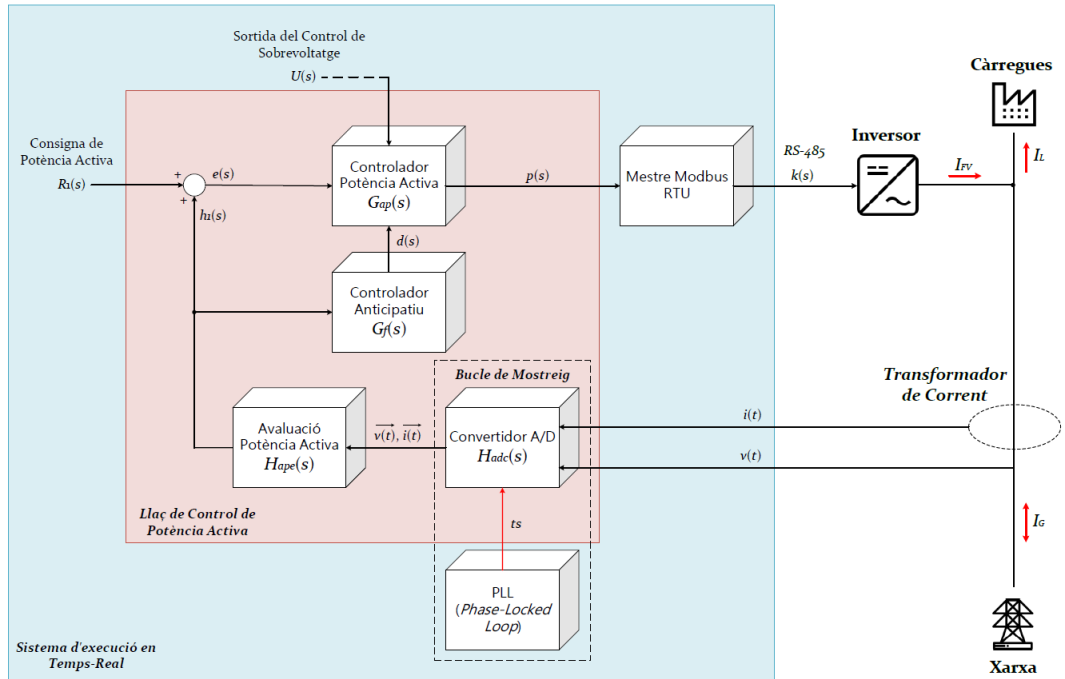


Fig. 4. Sistema de Control de Potència Activa

Controlador Potència Activa - $G_{ap}(s)$

És el nucli del llaç de control, i és el que rep com a entrada el senyal d'error

$$e(s) = R_1(s) - h_1(s) \quad (2)$$

on:

$R_1(s)$ és el valor de referència de la potència activa.

$h_1(s)$ és el senyal del valor calculat de la potència activa.

La seva sortida és $p(s)$, el senyal de control que es transformarà en una comanda per a l'actuador. La funció de transferència del controlador PI:

$$G_{ap}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3)$$

Controlador Anticipatiu o Feedforward - $G_f(s)$

S'encarrega de compensar les dinàmiques del sistema afegint acció anticipada. Rep el senyal de potència calculada $h_1(s)$ i genera una acció $d(s)$ per ajudar al controlador principal. La seva sortida es suma a $G_{ap}(s)$ per generar la

comanda total $p(s)$. La funció de transferència és proporcional:

$$G_f(s) = K_f \quad (4)$$

Avaluació Potència Activa - $H_{ape}(s)$

Processa les mesures de tensió $v(t)$ i corrent $i(t)$, calcula la potència activa, i aplica el mode de seguiment esdevenint el senyal $h_1(s)$. Es basa en la fórmula:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v_i(t) \cdot i_i(t) dt \quad (5)$$

on:

$v_i(t) \cdot i_i(t)$ és la potència instantània.

T és el període de temps de mostratge.

Convertidor A/D - $H_{adc}(s)$

Digitalitza les mesures d'entrades analògiques de tensió i corrent. Té un retard associat t_s , en el domini de Laplace, típic de la discretització d'un sistema en temps continu:

$$H_{adc}(s) = e^{-t_s(s)} \quad (6)$$

PLL (Phase Locked Loop)

Sincronitza el sistema amb la fase de la xarxa i proporciona la referència de fase necessària per al càlcul de potència activa i detecció de components fonamentals.

Mestre Modbus RTU i Inversor (Planta)

El senyal $p(s)$ es transmet com a comanda $k(s)$ cap a l'actuador mitjançant una interfície RS-485 i un protocol Modbus RTU. L'inversor modula la potència injectada o consumida. On l'equació de la sortida $p(t)$, del Controlador PI + Controlador anticipatiu (Feedforward) en el domini del temps, tal com s'utilitza al llaç de control de potència activa:

$$p(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_f \cdot h_1(t) \quad (7)$$

on:

Els primers dos termes són la correcció PI sobre l'error.

El tercer terme és l'acció anticipada basada en la mesura directa de la sortida, per millorar la resposta i reduir el retard. El senyal de sortida del control anticipatiu:

$$d(t) = K_f \cdot h_1(t) \quad (8)$$

La sortida modificada del bloc $G_{ap}(s)$:

$$p(t) = \begin{cases} u(t) & \text{si } p(t) \geq u(t), \\ p(t) & \text{si } p_{\min}(t) < p(t) < u(t), \\ p_{\min}(t) & \text{si } p(t) \leq p_{\min}(t) \end{cases} \quad (9)$$

$u(t)$ és el senyal de sortida del bloc $G_{c2}(s)$.

L'essència d'aquest llaç de control rau en la seva capacitat d'adaptació per gestionar un procés o planta amb dues respostes temporals molt diferents:

- Quan l'actuador augmenta la potència de generació (resposta lenta).
- Quan l'actuador disminueix la potència de generació (resposta ràpida).

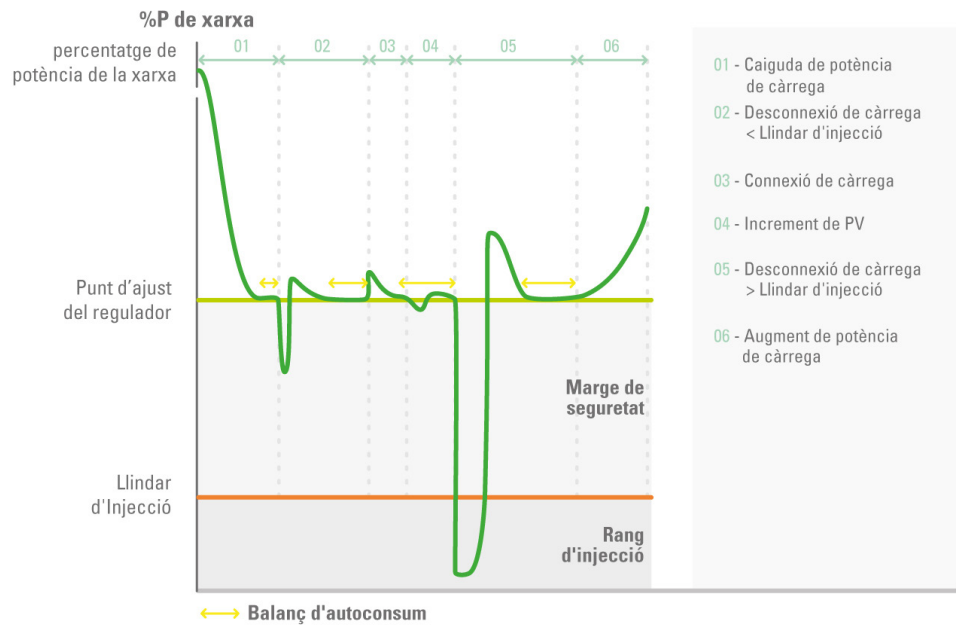


Fig. 5. Resposta dinàmica del P-control subjecte a múltiples variacions de càrrega.

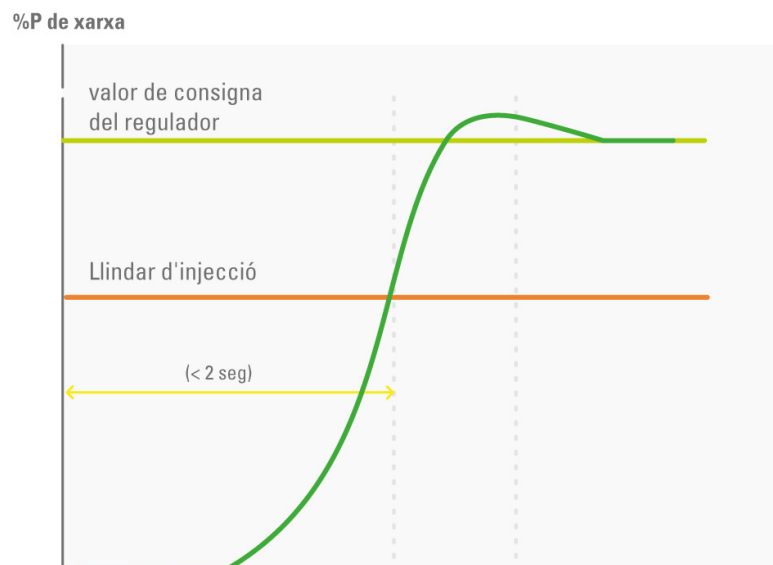


Fig. 6. Resposta transitoria del P-control a una desconnexió sobtada de càrrega.

Per maximitzar el rendiment de l'equip de potència davant de perturbacions del sistema, s'implementa un control anticipatiu (Feedforward) com a resposta ràpida del controlador principal. Aquest controlador permet adaptar la resposta del llaç, actuant de manera eficient davant de múltiples variables externes al sistema, com ara variacions ràpides de càrrega, augments sobtats de la irradiància solar o fluctuacions de la xarxa elèctrica.

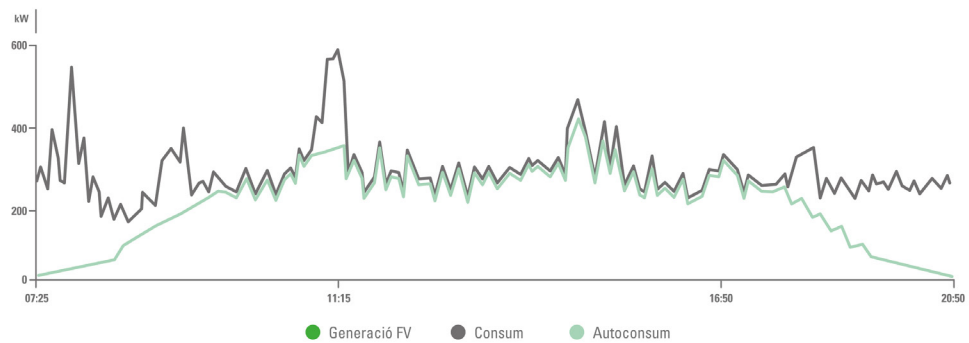


Fig. 7. Corbes de potència d'una instal·lació solar amb el P-control activat (Consigna de Potència Activa = 0)

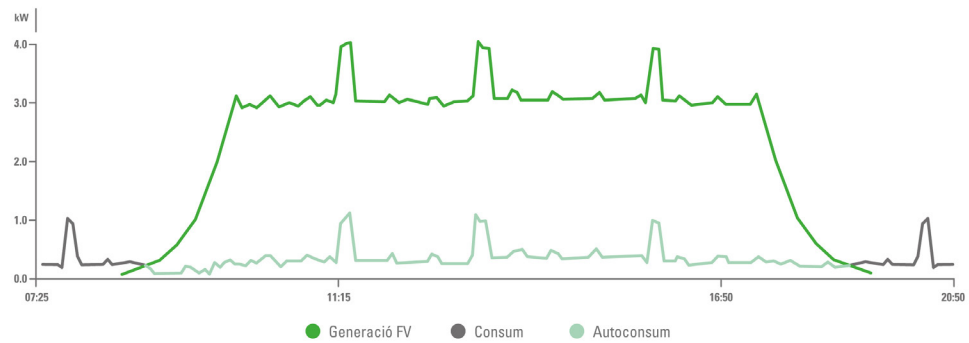


Fig. 8. Corbes de potència d'una instal·lació solar amb el P-control activat (Consigna de Potència Activa > 0)

Llaç de Control de Sobrevoltatge (U-control)

Quan la generació fotovoltaica és molt elevada (per exemple, en dies assolellats amb baixa demanda local), es pot produir un increment de la tensió al punt de connexió degut principalment a efectes relacionats amb el balanç entre generació i consum i les característiques de la xarxa elèctrica. El gestor energètic, mitjançant un algoritme de control que regula contínuament la generació de potència, actua per evitar que es superin els límits de tensió admissibles. Aquest mecanisme es coneix com a Llaç de Control de Sobrevoltatge, i redueix progressivament la potència activa injectada quan la tensió supera el llindar establert $R_2(s)$, evitant així desconexions sobtades i mantenint la planta connectada davant de variacions puntuals de la xarxa.

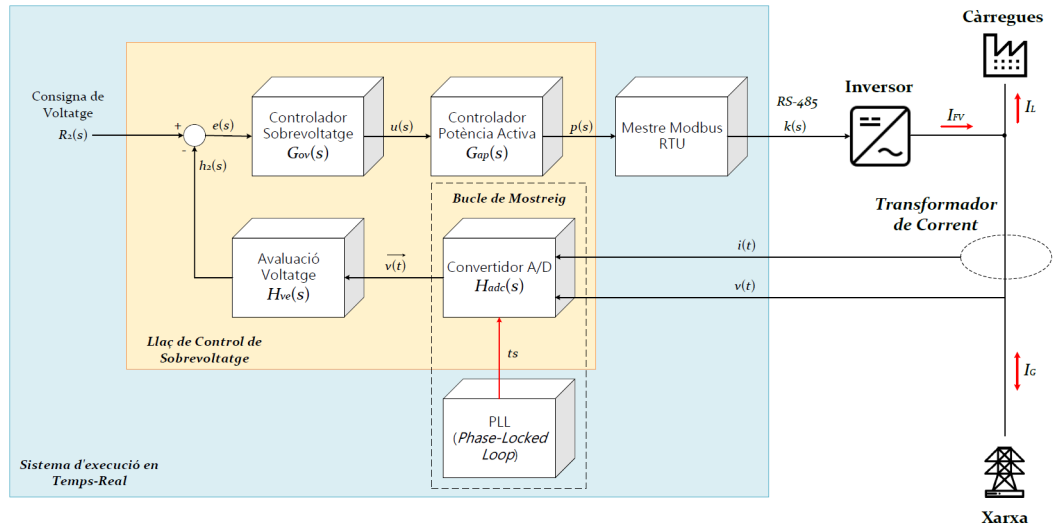


Fig. 9. Sistema de Control de Sobrevoltatge

Controlador Sobrevoltatge - $G_{ov}(s)$

És el nucli del llaç de control, i és el que rep com a entrada el senyal d'error

$$e(s) = R_2(s) - h_2(s) \quad (10)$$

on:

$R_2(s)$ és el valor de referència del voltatge llindar.

$h_2(s)$ és el senyal del valor de voltatge calculat.

La seva sortida és $u(s)$, el senyal de control que s'enviarà al bloc de control $G_{ap}(s)$.

La funció de transferència del controlador PI:

$$G_{ov}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (11)$$

On l'equació de la sortida $u(t)$, del Controlador PI en el domini del temps, tal com s'utilitza al llaç de control de sobrevoltatge:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (12)$$

On tots dos termes són la correcció PI sobre l'error.

Avaluació Voltatge - $H_{ve}(s)$

Processa la mesura de tensió $v(t)$ eficaç i aplica el mode de seguiment, esdevenint el senyal $H_2(s)$.

Es basa en la fórmula:

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_i^2(t) dt} \quad (13)$$

on:

$v_i(t)$ és el voltatge instantani.

T és el període de temps de mostratge.

Convertidor A/D - $H_{adc}(s)$

Digitalitza la mesures d'entrada analògica de tensió. Té un retard associat t_s , en el domini de Laplace, típic de la discretització d'un sistema en temps continu:

$$H_{adc}(s) = e^{-t_s(s)} \quad (14)$$

PLL (Phase Locked Loop)

Sincronitza el sistema amb la fase de la xarxa i proporciona la referència de fase necessària per al càlcul de potència activa i detecció de components fonamentals.

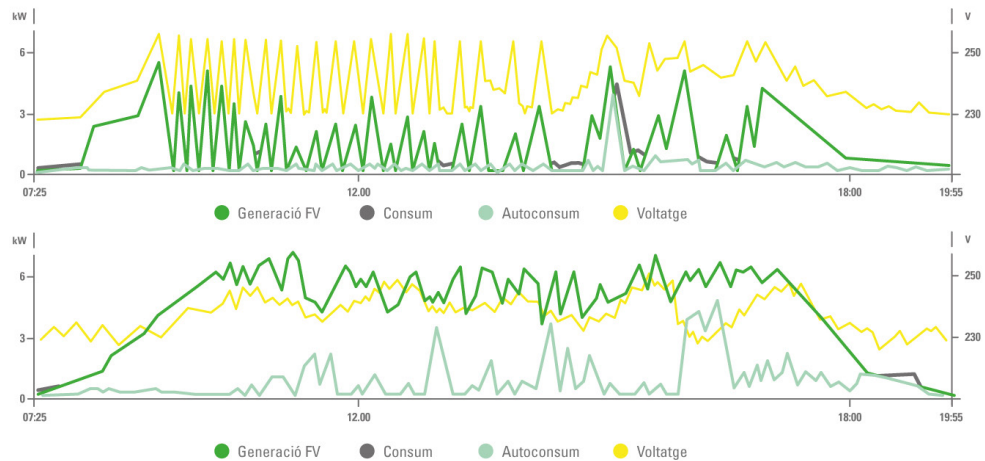


Fig. 10. Comparativa de corbes de potència i fluctuació de la tensió en una instal·lació solar amb l'U-control desactivat (imatge superior) i activat (imatge inferior)

Aquest sistema de control resulta especialment rellevant en instal·lacions connectades a xarxes de distribució dèbils, on les fluctuacions de tensió són més freqüents. El laç de control esdevé clau per protegir la instal·lació i garantir l'estabilitat del sistema elèctric.

Llaç de Control de Potència Reactiva (Q-control)

El control de la potència reactiva és un element clau per garantir l'estabilitat, l'eficiència i la qualitat del subministrament elèctric. En un sistema de potència, la potència reactiva no produeix treball útil, però és essencial per mantenir els nivells de tensió dins dels marges operatius i assegurar el funcionament correcte dels equips elèctrics.

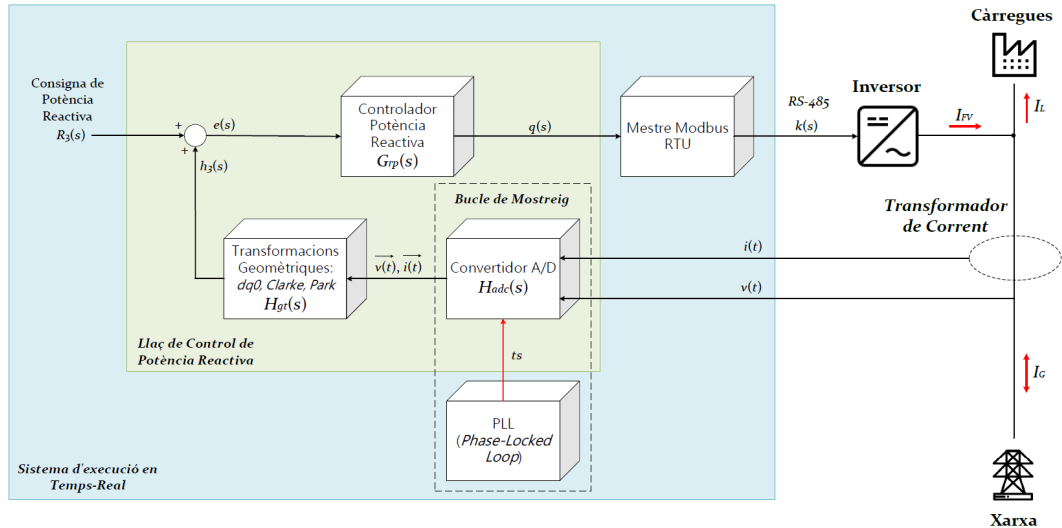


Fig. 11. Sistema de Control de Potència Reactiva

Controlador Potència Reactiva - $G_{rp}(s)$

És el nucli del llaç de control, i és el que rep com a entrada el senyal d'error

$$e(s) = R_3(s) - h_3(s) \quad (15)$$

on:

$R_3(s)$ és el valor de referència de la potència reactiva.

$h_3(s)$ és el senyal del valor calculat de la potència reactiva.

La seva sortida és $q(s)$, el senyal de control que es transformarà en una comanda per a l'actuador. La funció de transferència del controlador PI:

$$G_{rp}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (16)$$

Transformades Geomètriques: $dq0$, Clarke, Park - $H_{gr}(s)$

Processa les mesures de tensió $v(t)$ i corrent tensió $i(t)$, calcula la potència reactiva utilitzant les transformacions geomètriques, i aplica el mode de seguiment esdevenint el senyal $h_3(s)$:

Transformada de Clarke.

La transformació de Clarke converteix les tensions/corrents trifàsiques (a,b,c) en components ortogonals estacionaris ($\alpha, \beta, 0$):

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (18)$$

on:

v_a, v_b, v_c són les tensions de fase instantànies.

i_a, i_b, i_c són els corrents de fase instantanis.

v_a, v_β, v_0 i i_a, i_β, i_0 són les components ortogonals estacionàries ($\alpha, \beta, 0$) de les tensions i els corrents.

Interpretació geomètrica:

α i β formen un sistema de coordenades ortogonal en el pla complex, v_0 i i_0 són les components homopolars (zero en sistemes equilibrats).

Transformada de Park

La transformació de Park converteix els components $\alpha \beta$ en un sistema de referència rotatiu ($d, q, 0$) sincronitzat amb la xarxa elèctrica, a velocitat ω , mitjançant el bloc PLL. La transformació de Clarke converteix les tensions/corrents trifàsiques (a, b, c) en components ortogonals estacionaris ($\alpha, \beta, 0$):

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

on:

$\theta = \omega t$ és l'angle de rotació del sistema.

Interpretació geomètrica:

v_d, v_q i i_d, i_q són components en eixos ortogonals rotatius i en règim permanent.

v_d, v_q són constants.

En el sistema $dq0$.

La potència reactiva es calcula com:

$$Q = \frac{3}{2}(v_q i_d - v_d i_q) \quad (21)$$

Interpretació geomètrica: Q depèn de la diferència entre els productes creuats de les components dq .

Si v_d és la component principal (eix directe alineat amb la tensió), llavors, i_q contribueix a la potència reactiva.

Convertidor A/D - $H_{adc}(s)$

Digitalitza les mesures d'entrades analògiques de tensió i corrent.

Té un retard associat t_s , en el domini de Laplace, típic de la discretització d'un sistema en temps continu:

$$H_{adc}(s) = e^{-t_s(s)} \quad (22)$$

PLL (Phase Locked Loop)

Sincronitza el sistema amb la fase de la xarxa i proporciona la referència de fase necessària per al càlcul de potència activa i detecció de components fonamentals.

MestreModbus RTU i Inversor (Planta)

El senyal $q(s)$ es transmet com a comanda $k(s)$ cap a l'actuador mitjançant una interfície RS-485 i un protocol Modbus RTU.

L'inversor modula la potència injectada o consumida. On l'equació de la sortida $q(t)$, del Controlador PI en el domini del temps, tal com s'utilitza al llaç de control de potència reactiva:

$$q(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (23)$$

On tots dos termes són la correcció PI sobre l'error.

Control de potència reactiva i gestió avançada de perfils $U-Q/Pmax$

El control de potència reactiva incorpora la capacitat de gestionar activament els perfils de les corbes $U-Q/Pmax$, mitjançant l'ajust dinàmic del senyal de consigna $R_3(s)$, d'acord amb els requisits tècnics definits pel Reglament (UE) 2016/631 sobre la connexió de generadors a la xarxa.

El perfil de resposta de potència reactiva Q en percentatge de la potència activa màxima del sistema de generació solar $Pmax$, es mostra a la Figura 12. Aquest gràfic il·lustra com el sistema reacciona davant sobretensions ($U/Un > 1 pu$) o subtensions ($U/Un < 1 pu$) expressats amb valors unitaris (pu) respecte el voltatge nominal Un .

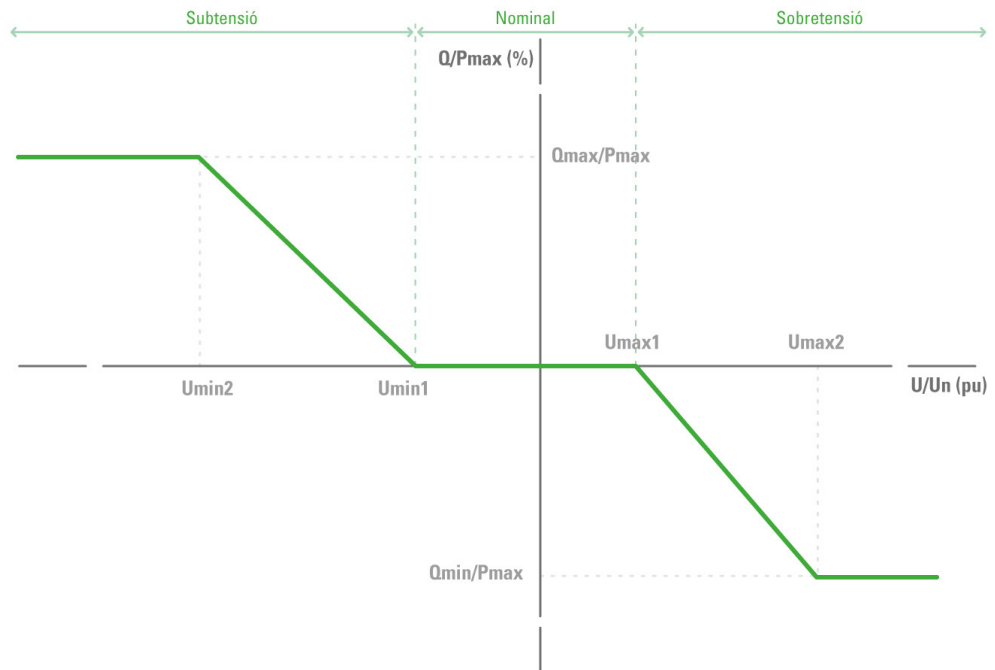


Fig. 12. Injecció/Absorció de potència reactiva requerida en funció del valor de tensió al punt de connexió del sistema de generació

on els límits ajustables són:

Umin2: Límit d'emergència per a subtensions extremes.

Umin1: Límit inferior per activar la injecció de reactiva.

Umax1: Límit superior per activar l'absorció de reactiva.

Umax2: Límit d'emergència per a sobretensions extremes.

Qmax/Pmax: Límit de la capacitat per produir o injectar potència activa (capacitiu).

Qmin/Pmax: Límit de la capacitat per consumir o absorbir potència activa (inductiu).

Taula de la resposta del sistema segons els rangs de voltatge

Zona d'operació	Rang	Resposta
Nominal	$U_{min1} \leq U/U_n \leq U_{max1}$	El sistema no actua ($Q = 0$)
Sobretensió	$U_{max1} < U/U_n \leq U_{max2}$ o $U/U_n > U_{max2}$	El sistema absorbeix reactiva (valors negatius de Q/P_{max}) per reduir la tensió
Subtensió	$U_{min2} \leq U/U_n < U_{min1}$ o $U/U_n < U_{min2}$	El sistema injecta reactiva (valors positius de Q/P_{max}) per elevar la tensió

Mitjançant el llaç de control de potència reactiva (Q-control), el sistema és capaç de monitorar en temps real les condicions de la xarxa i actuar dinàmicament sobre els inversors fotovoltaics que disposen de capacitat de regulació de potència reactiva. Aquest control, combinat amb el gestor de perfils $U-Q/Pmax$, permet:

- Inyectar o absorbir potència reactiva de forma automàtica, estabilitzant la tensió en punts crítics de la xarxa.
- Adaptar-se als requisits específics de l'operador de xarxa, com ara corbes característiques $P(f)$, $Q(V)$ o altres especificacions definides en els codis de xarxa.
- Millorar el factor de potència global del sistema, reduint les pèrdues per efecte Joule i alliberant capacitat en línies i transformadors.
- Evitar penalitzacions econòmiques associades al consum excessiu d'energia reactiva, habitualment imposades per les companyies distribuïdores.
- Contribuir a l'estabilitat de la xarxa davant de fluctuacions de càrrega, connexions o desconnexions sobtades i variabilitat de la generació renovable.

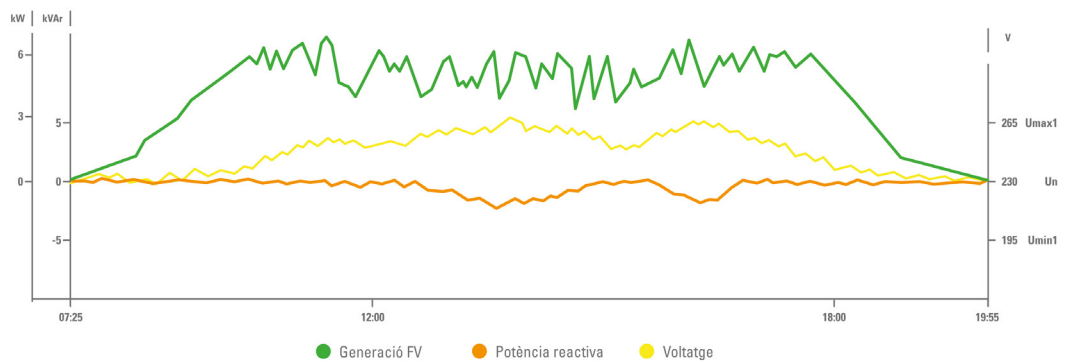


Fig. 13. Corba de potència reactiva d'una instal·lació solar amb el Q-control activat

Les penalitzacions per consum d'energia reactiva s'originen pel fet que aquesta energia, tot i ser necessària per al funcionament de certs equips, no realitza treball útil, però sí que satura la capacitat de transport de les línies i transformadors, incrementant les pèrdues i disminuint l'eficiència general del sistema elèctric.

Conclusions

La integració de múltiples llaços de control en un únic gestor energètic representa un avenç fonamental en la gestió eficient d'instal·lacions solars fotovoltaïques. A través dels llaços de potència activa (P-control), sobrevoltatge (U-control) i potència reactiva (Q-control), el sistema proporciona una resposta dinàmica alineada amb els requisits normatius de la xarxa elèctrica. El gestor energètic s'encarrega d'analitzar, controlar i optimitzar en temps real el funcionament d'un o diversos inversors solars, maximitzant-ne el rendiment de l'autoconsum i garantint-ne la integració òptima amb la xarxa de distribució.

Aquest enfocament de control coordinat permet:

- Optimitzar l'autoconsum, reduint la dependència de la xarxa i millorant l'eficiència energètica.
- Evitar riscos operatius, com sobretensions o desequilibris, millorant l'estabilitat i la qualitat de la xarxa.
- Adaptar-se als requisits normatius, com els definits al Reglament (UE) 2016/631 i a la UNE 217001:2020.
- Reduir costos i penalitzacions associats al consum d'energia reactiva i a un mal factor de potència.
- Millorar la resiliència del sistema davant fluctuacions de càrrega i variabilitat de la generació renovable.

En definitiva, la incorporació d'un sistema de control multinivell dins d'un gestor energètic avançat converteix la planta fotovoltaica en un element actiu i preparat per afrontar els desafiaments del model energètic del futur, cada vegada amb més penetració d'energies renovables.

Referències

- [1] Albert MARZÀBAL, Josep M. GUERRERO and Juan C. VASQUEZ. EL MÉTODO «DROOP» MÁS ALLÁ DEL SIMPLE PARALELADO DE SAIS. SALICRU whitepapers, 2017. Biblioteca privada de Salicru.
- [2] C. DORF, Richard and H. BISHOP, Robert. Sistema de Control Moderno. 6185,5. 10ª Edició. Madrid: PEARSON EDUCATION, 2005. p. 1-70, 72-80. ISBN núm. 84-205-4401-9.
- [3] A. BAHÓN, Cecilio and R. GINER, Cristóbal. Tecnología de sistemas de control. 1ª Edició. Barcelona: Ediciones UPC, 2004. p. 41-80. ISBN núm. 84-8301-778-4.
- [4] O'ROURKE, COLM J. et al. A Geometric Interpretation of Reference Frames and Transformations: dq0, Clarke, and Park. IEEE Transactions on Energy Conversion 34, 4 (December 2019): 2070 - 2083 © 2019 IEEE. MIT Open Access Articles.
- [5] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN I CERTIFICACIÓN. Ensayos para sistemas que eviten el vertido de energía a la red de distribución. UNE 217001:2020. Madrid: AENOR, 2020. Biblioteca privada de Salicru.
- [6] DIARIO OFICIAL DE LA UNION EUROPEA. Establece un código de red sobre requisitos de conexión de generadores a la red. UE 2016/631 de 14 abril de 2016. Comisión Europea. Biblioteca privada de Salicru.



ES

CAT

INTEGRATION OF CONTROL LOOPS IN ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS

By David Oms Planchart (R&D Product Leader) SALICRU

Introduction

In a world shaped by climate change and rising energy consumption, photovoltaic solar energy is becoming one of the most potent and essential solutions to the challenges of the 21st century. This technology efficiently converts sunlight into electricity, providing a clean and renewable energy source, and as such, it plays a crucial role in facilitating the transition to more sustainable energy systems.

In this context of exponential growth in distributed generation and electricity demand, one particular critical component in every photovoltaic installation takes centre stage: the energy manager. This control device acts as the brain of the system, managing its behaviour using advanced control methods to ensure compliance with current regulations. It is a device capable of analysing, controlling, and optimising the operation of one or more generation units (solar inverters) in real-time, maximising the performance of self-supply systems and ensuring optimal integration with the electricity distribution grid.

The energy manager is placed at the installation's point of connection (POCO), where it controls the bidirectional flow of active and reactive power P_G from the electrical grid using the PV power generated P_{PV} by the solar inverter, in order to comply with the grid regulations taking into account the installation's consumption P_L .

This document sets out SALICRU's recommendation regarding the type and sensitivity of the differential protection required for the installation of its inverters, and the regulations on which it is based.

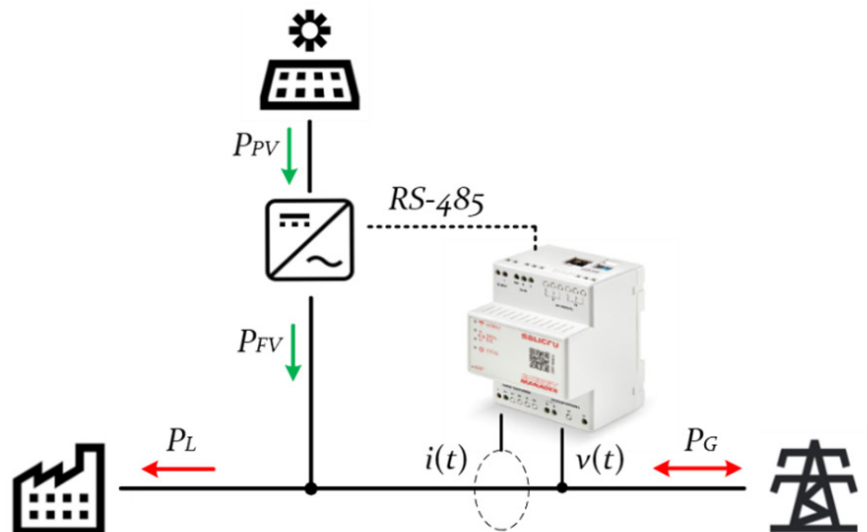


Fig. 1. Generic connection diagram of an energy manager

Multiple control systems in a single energy manager

A control system is an interconnected set of components that form a configuration designed to generate a desired response. These systems are mainly based on linear systems theory, which establishes a cause-and-effect relationship between their components.

Thus, any component or process to be controlled can be represented by a block, as shown in Figure 2. In an energy manager, this cause and effect relationship takes the form of the input and output signals and any processing that the system applies to the input signal in order to generate the output signal.

To achieve a desired response from a system output, we often use a control loop, which is a fundamental mechanism in system control. This loop uses the output measurement and its feedback to compare it with the reference measurement (the expected output), thereby generating a control action that minimises the error between the two.

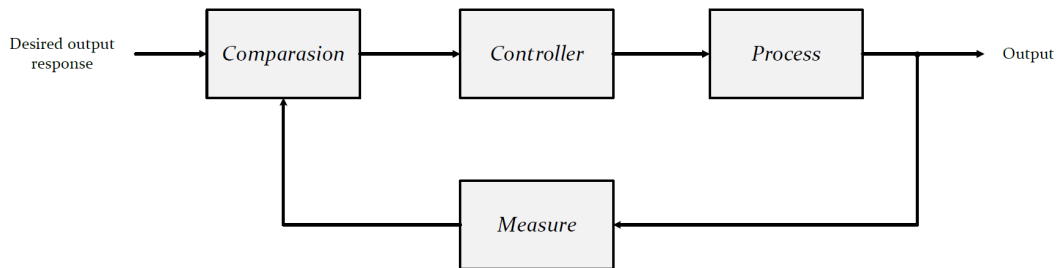


Fig. 2. Closed-loop control system (with feedback)

Desired output response (Reference): This is the setpoint to be achieved at the system's output (e.g., the active power setpoint in a solar inverter).

Comparator: This block calculates the error, which is the difference between the reference and the actual measurement of the system.

$$Error = Reference - Measurement \quad (1)$$

It is the starting point of the control loop, which detects whether action is required to correct the output.

Controller: Receives the error as input and generates a control signal to correct the behaviour of the system. It may be a proportional (P), proportional-integral (PI), proportional-integral-derivative (PID) controller, etc.

Process or Plant: This is the physical system we want to control (e.g. a boiler, an engine, power equipment, etc.). It receives the control signal and produces an output based on its own dynamics.

Measurement: The system measurement is known as the feedback signal. This block represents the sensor or device that measures the system's actual output and compares it to the desired output response.

In the field of energy management, especially in environments with distributed generation and self-supply, the incorporation of multiple control loops within a single device is becoming increasingly necessary. A modern energy manager can integrate three independent but coordinated control loops to control different critical aspects of the electrical system:

The Active Power Control Loop (P-control): regulates the flow of active power to balance generation and consumption in real-time. This allows for the optimisation of renewable energy sources, minimising the energy imported from or exported to the grid, while keeping the system frequency within the established limits.

Overvoltage control loop (U-control): monitors the system voltage and acts to prevent values above the permissible limits, especially in situations of excess generation (such as at midday, when photovoltaic production is high). This control protects the equipment and prevents sudden disconnections by the inverters or the distributor.

Reactive Power Control Loop (Q-control): adjusts the injection or consumption of reactive power to maintain voltage within appropriate values and optimise the power factor in accordance with the associated standard. It also reduces losses in the network and avoids financial penalties associated with poor reactive adjustment.

The combination of these three loops in a single energy management device enables an efficient, fast and coordinated response to system fluctuations. This approach improves both the efficiency and stability of the installation, while ensuring regulatory compliance and protecting the electrical infrastructure. It is, in short, a crucial component for achieving a sustainable and secure energy transition.

The diagram below (Figure 3) illustrates this multi-level control system. The three control loops operate independently but are interconnected, all functioning in real-time within a microcontroller. This setup ensures a swift and coordinated response to maintain stability and regulatory compliance.

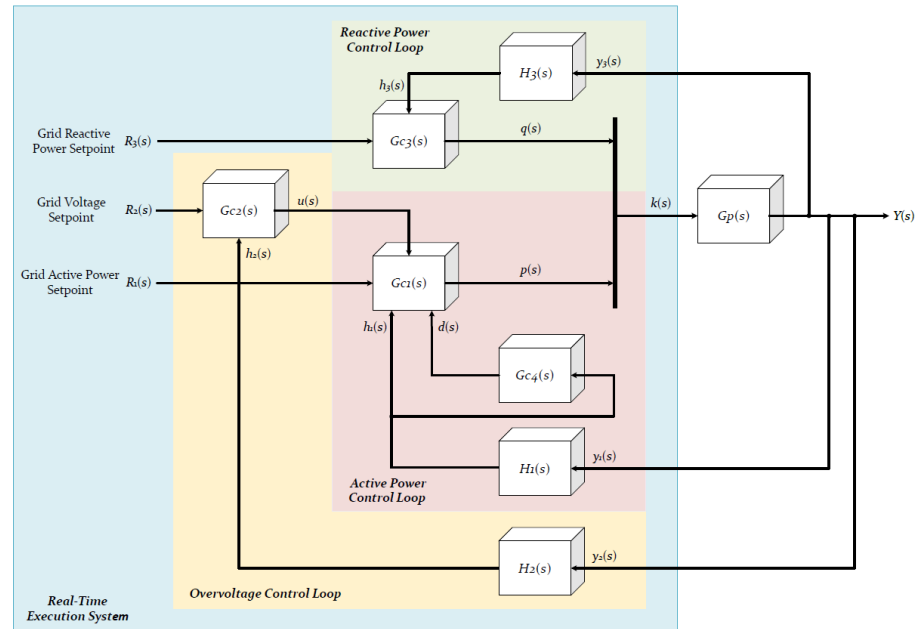


Fig. 3. Block diagram showing the implementation of the multi-loop approach

Block	Description
$G_{c1}(s)$	Active Power Controller
$G_{c2}(s)$	Overvoltage Controller
$G_{c3}(s)$	Reactive Power Controller
$G_{c4}(s)$	Anticipatory Controller
$H_1(s)$	Active Power Measurement
$H_2(s)$	Voltage Measurement
$H_3(s)$	Reactive Power Measurement
$G_p(s)$	Process / Plant

The primary objective of the system is to regulate the active and reactive power exchanged with the mains network and keep overvoltages within acceptable limits, ensuring the stability and quality of the supply. These three objectives are achieved by means of three closed control loops represented by the following blocks:

P-control: $G_{c1}(s)$, $G_{c4}(s)$ y $H_1(s)$

U-control: $G_{c2}(s)$ y $H_2(s)$

Q-control: $G_{c3}(s)$ y $H_3(s)$

All three act on a common process represented by $G_p(s)$, but each regulates a different parameter. These parameters are transformed into the process input signals: $p(s)$ and $q(s)$, which combine to form $k(s)$, the total signal acting on the plant. The reference signals $R_1(s)$, $R_2(s)$ and $R_3(s)$ correspond to the setpoints of each controller, and $Y(s)$ represents the overall output of the system as the aggregate response of the three control loops.

Below is a comparative table of the multiple control loops, highlighting their functions in energy management, their main objectives and the associated control strategies.

Aspect	Active Power Control	Overvoltage Control	Reactive Power Control
Variable regulated	Active power P (kW)	Active power P (kW)	Active power Q (kVAr)
Main purpose	Optimise self-consumption and energy balance	Prevent local overvoltages and improve the stability of the electrical network	Maintain the power factor and voltage levels within operating margins
Typical action	Modulation of the equipment's generation	Reduction of P according to the network voltage	Inject/Absorb Q depending on the power factor and voltage
Types of regulation	PI control + anticipatory control	PI control	PI control
Main input	Active power measurement P at 4 quadrants	Voltage measurement	Reactive power measurement Q at 4 quadrants
Dynamic response	Fast	Slow	Slow
Monitoring modes based on the signal	<ul style="list-style-type: none"> - Maximum active consumption phase - Minimum active consumption phase - Average active consumption of the phases 	<ul style="list-style-type: none"> - Maximum voltage phase - Minimum voltage phase - Average voltage of the phases 	<ul style="list-style-type: none"> - Maximum reactive consumption phase - Minimum reactive consumption phase - Average reactive consumption of the phases - Reactive consumption by independent phases
Impact on the network	Improves power flow stability	Reduces the risk of overload or damage to equipment	Improves network quality and reduces penalties
Required by regulatory standards?	Yes, UNE 217001:2020	No	Yes, UE 2016/631

Active Power Control Loop (P-control)

This loop regulates the amount of active energy consumed (import) or injected (export) into the electrical grid, maintaining a balance between the power generated by the solar inverters and the system's demand. This diagram shows a real-time control system implemented, for example, in a microcontroller to control the active power exchanged with the electrical grid.

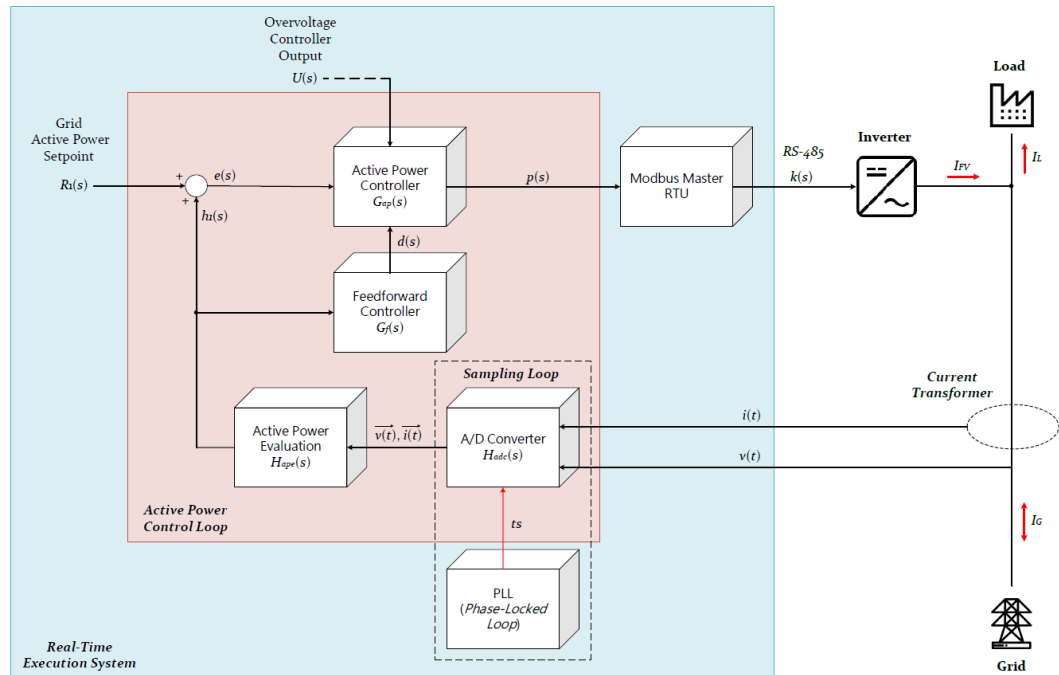


Fig. 4. Active Power Control System

Active Power Controller - $G_{ap}(s)$

This is the core of the control loop, and it is the part that receives the error signal as input

$$e(s) = R_1(s) - h_1(s) \quad (2)$$

where:

$R_1(s)$ is the reference value for the active power.

$h_1(s)$ is the signal of the calculated value of the active power.

Its output is $p(s)$, the control signal that will be transformed into a command for the inverter. The transfer function of the PI controller:

$$G_{ap}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3)$$

Anticipatory Controller or Feedforward - $G_f(s)$

This controller is responsible for compensating for the dynamics of the system by adding an anticipatory action. It receives the calculated power signal $h_1(s)$ and generates an action $d(s)$ to assist the main controller.

Its output is added to $G_{ap}(s)$ to generate the equivalent signal $p(s)$. The transfer function is proportional:

$$G_f(s) = K_f \quad (4)$$

Active Power Assessment - $H_{ape}(s)$

Processes the measurements of voltage $v(t)$ and current $i(t)$, calculates the active power and applies the monitoring mode by producing the signal $h_1(s)$. It uses a formula:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v_i(t) \cdot i_i(t) dt \quad (5)$$

where:

$v_i(t) \cdot i_i(t)$ is the instantaneous power.

T is the sampled time period.

A/D converter - $H_{adc}(s)$

Digitises the analogue voltage and current input measurements. It has an associated average delay t_s , in the Laplace domain, typical of the discretisation of a continuous-time system:

$$H_{adc}(s) = e^{-t_s(s)} \quad (6)$$

PLL (Phase Locked Loop)

Synchronises the system with the mains phase and provides the phase reference required for active power calculation and fundamental component detection.

Master Modbus RTU and Inverter (Plant)

The signal $p(s)$ is transmitted as a command $k(s)$ to the inverter via an RS-485 interface and a Modbus RTU protocol. The inverter modulates the generated power. Where the output equation $p(t)$, of the PI controller + anticipatory controller (Feedforward) in the time domain, as used in the active power control loop, is:

$$p(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_f \cdot h_1(t) \quad (7)$$

where:

The first two terms are the PI correction on the error.

The third term is the anticipatory action based on the direct measurement of the output, to improve the response and reduce the delay. The output signal of the anticipatory control:

$$d(t) = K_f \cdot h_1(t) \quad (8)$$

The modified output of block $G_{ap}(s)$:

$$p(t) = \begin{cases} u(t) & \text{si } p(t) \geq u(t), \\ p(t) & \text{si } p_{\min}(t) < p(t) < u(t), \\ p_{\min}(t) & \text{si } p(t) \leq p_{\min}(t) \end{cases} \quad (9)$$

$u(t)$ is the output signal of block $G_{c2}(s)$.

The essence of this control loop lies in its adaptive capacity to manage a process or plant with two very different time responses:

- When the actuator increases the generation power (slow response).
- When the actuator decreases the generation power (fast response).

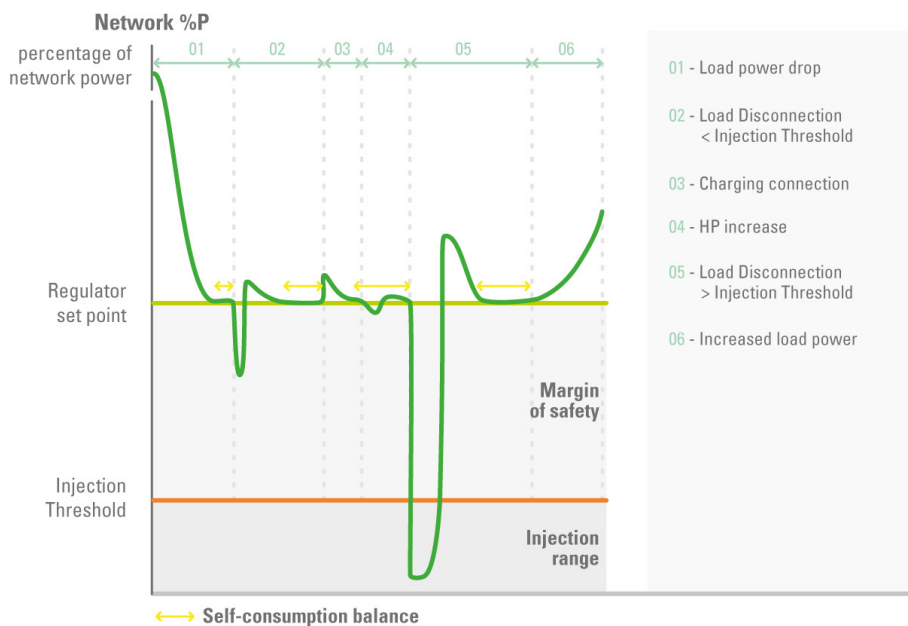


Fig. 5. Dynamic response of P-control subject to multiple load variations.

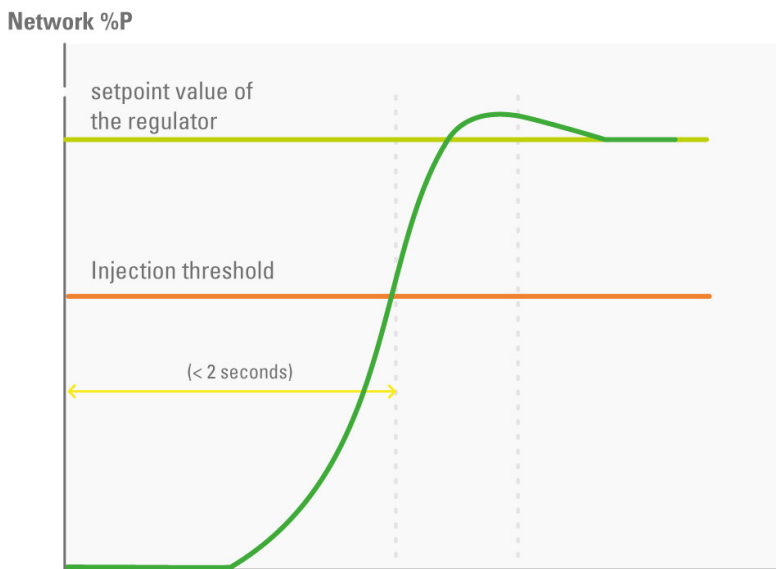


Fig. 6. Transient response of the P-control to a sudden load disconnection.

To maximise the performance of the power equipment in the event of system disturbances, a feedforward control is implemented as a rapid response from the main controller. This controller adapts the loop response, acting efficiently in the event of multiple external variables, such as rapid load variations, sudden increases in solar irradiance or fluctuations in the electrical network.

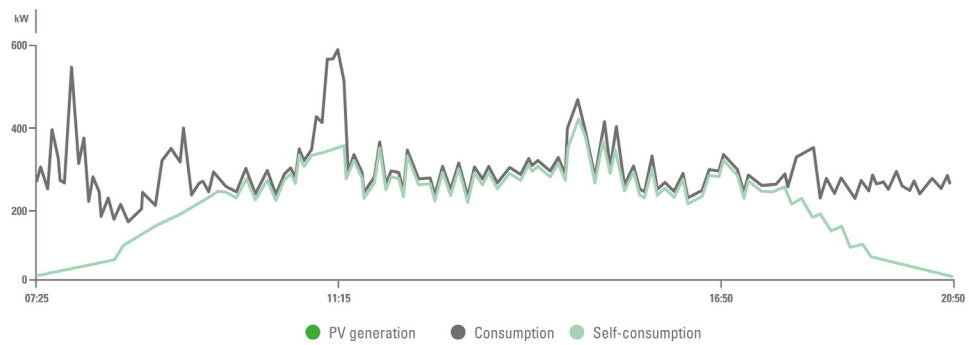


Fig. 7. Power curves of a solar installation with P-control activated (Active Power Setpoint = 0)

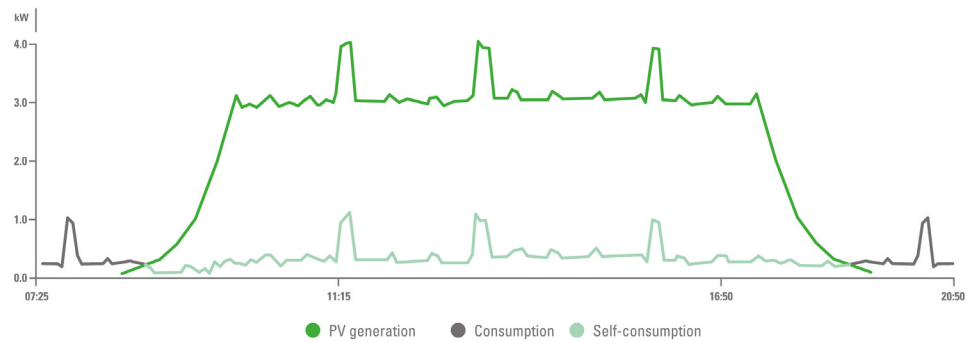


Fig. 8. Power curves of a solar installation with P-control activated (Active Power Setpoint > 0)

Overvoltage Control Loop (U-control)

When photovoltaic generation is high (for example, on sunny days with low local demand), there may be an increase in voltage at the connection point, primarily due to the effects of balancing generation and consumption, as well as the characteristics of the electrical grid. The energy manager, using a control algorithm that continuously regulates power generation, acts to prevent the permissible voltage limits from being exceeded. This mechanism is known as the Overvoltage Control Loop. It progressively reduces the active power injected when the voltage exceeds the established threshold $R_2(s)$, thereby preventing sudden disconnections and maintaining the plant's connection in the event of temporary network variations.

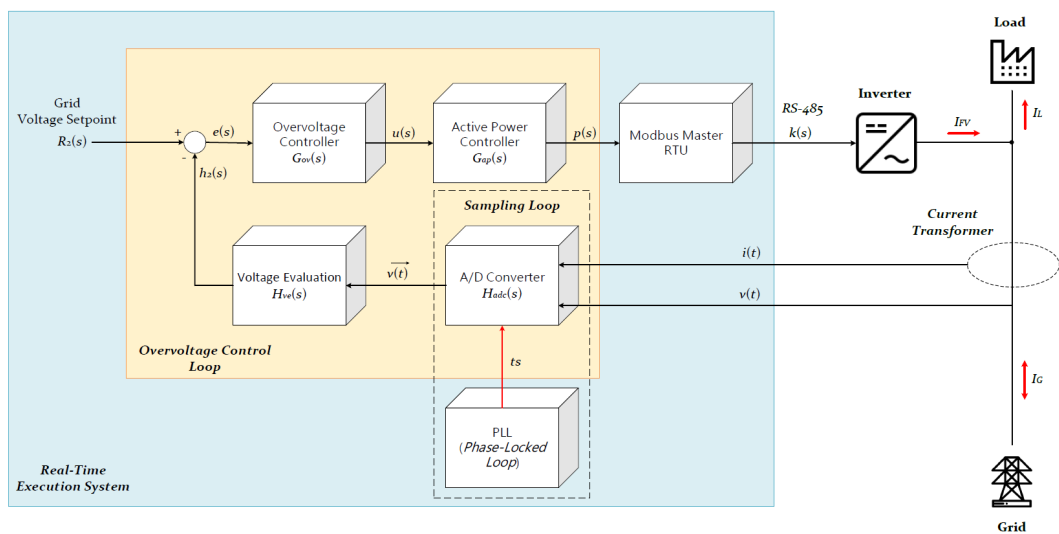


Fig. 9. Overvoltage Control System

Overvoltage Controller - $G_{ov}(s)$

This is the core of the control loop, and it is the part that receives the error signal as input

$$e(s) = R_2(s) - h_2(s) \quad (10)$$

where:

$R_2(s)$ is the reference value for the voltage threshold.

$h_2(s)$ is the signal of the calculated voltage value.

Its output is $u(s)$, a control signal that will be sent to the control block $G_{ap}(s)$.

The transfer function of the PI controller:

$$G_{ov}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (11)$$

Where the output equation $u(t)$, of the PI controller in the time domain, as used in the overvoltage control loop:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (12)$$

Both terms are the PI correction on the error.

Voltage Evaluation- $H_{ve}(s)$

Processes the effective voltage measurement $v(t)$ and applies the monitoring mode, producing the signal $H_2(s)$.

It uses a formula:

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_i^2(t) dt} \quad (13)$$

where:

$v_i(t)$ is the instantaneous voltage.

T is the sampled time period.

A/D converter - $H_{adc}(s)$

Digitises the analogue voltage and current input measurements. It has an associated average delay t_s in the Laplace domain, typical of the discretisation of a continuous-time system:

$$H_{adc}(s) = e^{-t_s(s)} \quad (14)$$

PLL (Phase Locked Loop)

Synchronises the system with the mains phase and provides the phase reference required for effective voltage calculation and fundamental component detection.



Fig. 10. Comparison of power curves and voltage fluctuations in a solar installation with U-control disabled (upper image) and enabled (lower image)

This control system is particularly relevant in installations connected to weak distribution networks, where voltage fluctuations are more frequent. The control loop is key for protecting the installation and ensuring the stability of the electrical system.

Reactive Power Control Loop (Q-control)

Reactive power control is a crucial element in ensuring the stability, efficiency, and quality of the power supply. In a power system, reactive power does not perform useful work; however, it is crucial for maintaining voltage levels within operating margins and ensuring the proper functioning of electrical equipment.

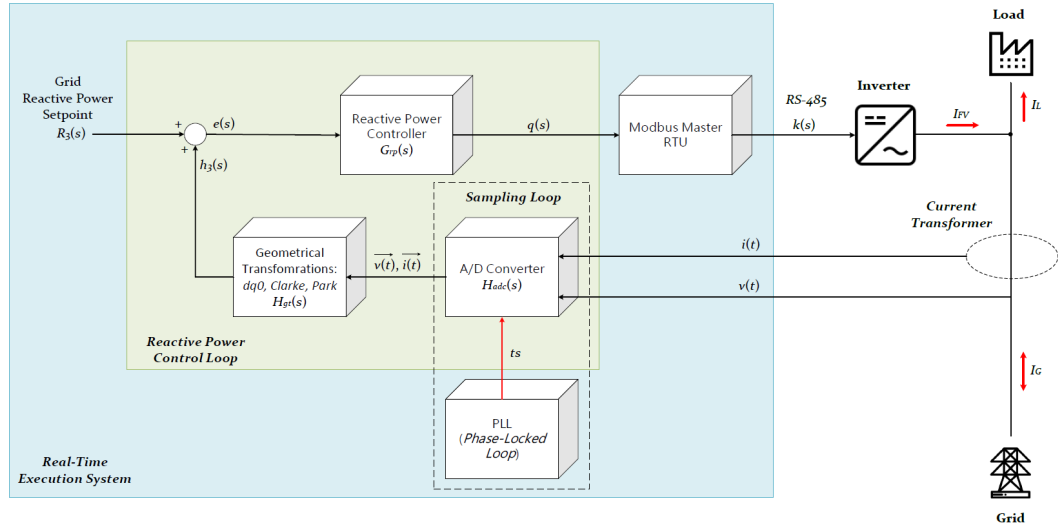


Fig. 11. Reactive Power Control System

Reactive Power Controller - $G_{rp}(s)$

This is the core of the control loop, and it is the part that receives the error signal as input

$$e(s) = R_3(s) - h_3(s) \quad (15)$$

where:

$R_3(s)$ is the reference value of the reactive power.

$h_3(s)$ is the signal of the calculated reactive power value.

Its output is $q(s)$, the control signal that will be transformed into a command for the inverter. The transfer function of the PI controller:

$$G_{rp}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (16)$$

Geometric Transformations: $dq0$, Clarke, Park - $H_{gr}(s)$

Processes the measurements of voltage $v(t)$ and current $i(t)$, calculates reactive power using geometric transformations, and applies monitoring mode by producing the signal $h_3(s)$:

Clarke transformation The Clarke transformation converts three-phase voltages/currents (a, b, c) into stationary orthogonal components ($\alpha, \beta, 0$):

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (18)$$

where:

v_a, v_b, v_c are the instantaneous phase voltages.

i_a, i_b, i_c are the instantaneous phase currents.

v_α, v_β, v_0 and i_α, i_β, i_0 are the stationary orthogonal components ($\alpha, \beta, 0$) of the voltages and currents.

Geometric interpretation:

α and β form an orthogonal coordinate system in the complex plane, v_0 and i_0 are the homopolar components (zero in balanced systems).

Park Transformation

The Park transformation converts the $\alpha \beta$ components into a rotating reference system ($d, q, 0$) synchronised with the electrical network at speed ω , by means of the PLL block. The Clarke transformation converts three-phase voltages/currents (a, b, c) into stationary orthogonal components ($\alpha, \beta, 0$):

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

where:

$\theta = \omega t$ is the angle of rotation of the system.

Geometric interpretation:

v_d, v_q y i_d, i_q are components in rotating orthogonal axes and in steady state:

v_d, v_q are constants.

In the system $dq0$.

The reactive power is calculated as:

$$Q = \frac{3}{2}(v_q i_d - v_d i_q) \quad (21)$$

Geometric interpretation: Q is dependent on the difference between the cross products of the components dq .

If v_d is the main component (direct axis aligned with the voltage), then, i_q contributes to the reactive power.

A/D converter - $H_{adc}(s)$

Digitises the analogue voltage and current input measurements.

It has an associated average delay t_s , in the Laplace domain, typical of the discretisation of a continuous-time system:

:

$$H_{adc}(s) = e^{-t_s(s)} \quad (22)$$

PLL (Phase Locked Loop)

Synchronises the system with the mains phase and provides the phase reference required for reactive power calculation and fundamental component detection.

Master Modbus RTU and **Inverter** (Plant)

The signal $q(s)$ is transmitted as a command $k(s)$ to the inverter via an RS-485 interface and a Modbus RTU protocol. The inverter modulates the generated reactive power.

Where the output equation $q(t)$, of the PI controller in the time domain, as used in the reactive power control loop:

$$q(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (23)$$

Both terms are the PI correction on the error.

Reactive power control and advanced U - Q/P_{max} profile management

The reactive power control incorporates the ability to actively manage the profiles of the U - Q/P_{max} curves, by dynamically adjusting the $R_3(s)$, setpoint signal, in accordance with the technical criteria defined by Regulation (EU) 2016/631 on the connection of generators to the grid.

The reactive power response profile Q as a percentage of the maximum active power of the solar generation system P_{max} , is shown in Figure 12. This diagram illustrates how the system reacts to overvoltages ($U/U_n > 1 pu$) or undervoltages ($U/U_n < 1 pu$) expressed as unit values (pu) relative to the rated voltage U_n .

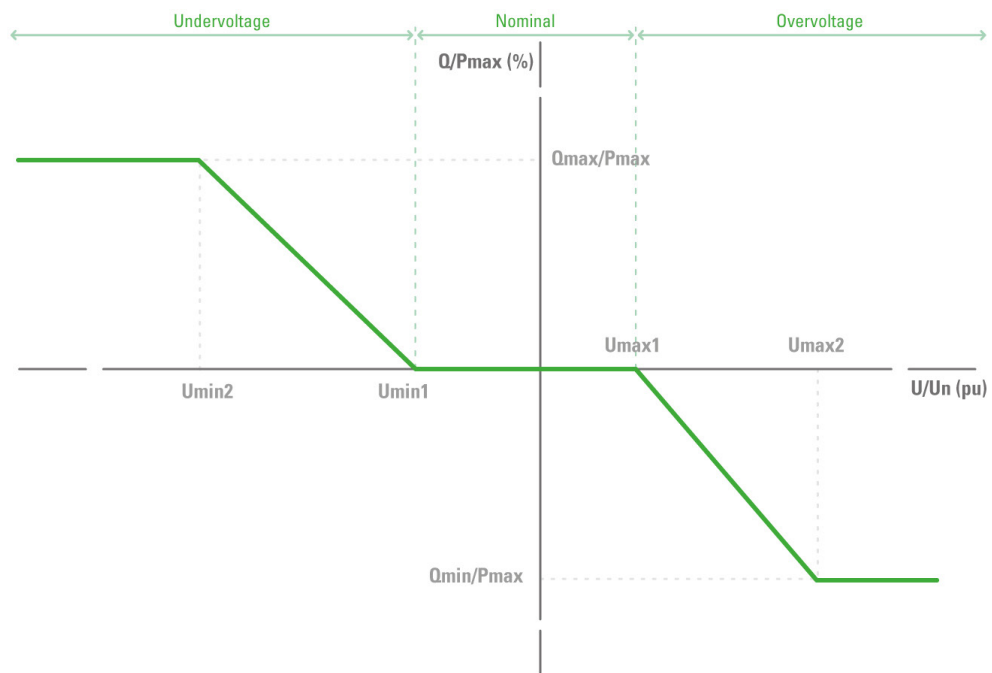


Fig. 12. Reactive power injection/absorption required depending on the voltage value at the connection point of the generation system

where the adjustable thresholds are:

Umin2: Emergency limit for extreme undervoltages.

Umin1: Lower limit for activating reactive injection.

Umax1: Upper limit for activating reactive absorption.

Umax2: Emergency limit for extreme overvoltages.

Qmax/Pmax: Limit of the capacity to produce active power (capacitive).

Qmin/Pmax: Limit of the capacity to consume active power (inductive).

Operating zone	Range	Response
Rated	$U_{min1} \leq U/U_n \leq U_{max1}$	The system doesn't act ($Q = 0$)
Overvoltage	$U_{max1} < U/U_n \leq U_{max2}$ or $U/U_n > U_{max2}$	The system absorbs reactive power (negative Q/P_{max} values) to reduce the voltage
Undervoltage	$U_{min2} \leq U/U_n < U_{min1}$ or $U/U_n < U_{min2}$	The system injects reactive power (positive Q/P_{max} values) to raise the voltage

Through the reactive power control loop (Q-control), the system is able to monitor network conditions in real time and act dynamically on photovoltaic inverters that have reactive power regulation capacity. This control, combined with the profile manager $U-Q/P_{max}$, allows the system to:

- Automatically inject or absorb reactive power, stabilising the voltage at critical points in the network.
- Adapt to the specific requirements of the network operator, such as, for example $P(f)$, $Q(V)$ characteristic curves or other specifications defined in the network codes.
- Improve the overall power factor of the system, reducing Joule losses and freeing up capacity in lines and transformers.
- Avoid financial penalties associated with excessive reactive energy consumption, usually imposed by distribution companies.
- Contribute to grid stability in the event of load fluctuations, sudden connections or disconnections, and variability in renewable generation.

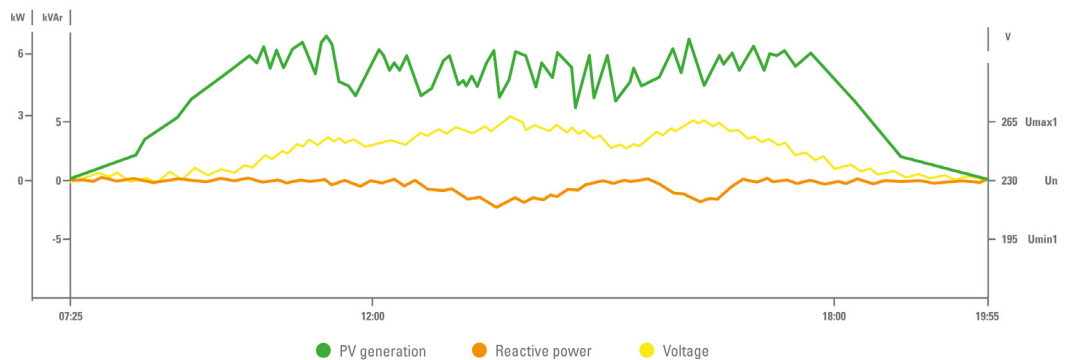


Fig. 13. Reactive power curve of a solar installation with Q-control activated

Penalties for reactive energy consumption arise from the fact that this energy, despite being necessary for the operation of certain equipment, does not perform useful work, but does saturate the transport capacity of lines and transformers, increasing losses and decreasing the overall efficiency of the electrical system.

Conclusions

The integration of multiple control loops into a single energy manager represents a fundamental advance in the efficient management of solar photovoltaic installations. Through the active power (P-control), overvoltage (U-control) and reactive power (Q-control), the system provides a dynamic response aligned with the regulatory requirements of the electricity grid. The energy manager is responsible for analysing, controlling and optimising the operation of one or more solar inverters in real time, maximising self-consumption performance and ensuring optimal integration with the distribution grid. This coordinated control approach enables the following benefits:

- Optimisation of self-consumption, leading to reduced dependence on the grid and enhanced energy efficiency.
- Mitigation of operational risks, such as power surges or imbalances, which improves grid stability and quality.
- Compliance with regulatory requirements, including those outlined in Regulation (EU) 2016/631 and UNE 217001:2020.
- Decreased costs and penalties associated with reactive energy consumption and poor power factor.
- Improved system resilience to load fluctuations and variability in renewable generation.

In short, incorporating a multi-level control system into an advanced energy manager can transform a photovoltaic plant into an active participant capable of addressing the challenges of the future energy model, which will be increasingly reliant on renewable energy sources.

References

- [1] Albert MARZÀBAL, Josep M. GUERRERO and Juan C. VASQUEZ. THE "DROOP" METHOD. BEYOND THE SIMPLE PARALLELING OF UPS SYSTEMS. SALICRU whitepapers, 2017. Salicru's private library.
- [2] C. DORF, Richard and H. BISHOP, Robert. Modern Control Systems. 6185.5. 10th Edition. Madrid: PEARSON EDUCATION, 2005. p. 1-70, 72-80. ISBN núm. 84-205-4401-9.
- [3] A. BAHÓN, Cecilio and R. GINER, Cristóbal. Control systems technology. 1st Edition. Barcelona: Ediciones UPC, 2004. p. 41-80. ISBN núm. 84-8301-778-4.
- [4] O'ROURKE, COLM J. et al. A Geometric Interpretation of Reference Frames and Transformations: dq0, Clarke, and Park. IEEE Transactions on Energy Conversion 34, 4 (December 2019): 2070 - 2083 © 2019 IEEE. MIT Open Access Articles.
- [5] SPANISH ASSOCIATION FOR STANDARDISATION AND CERTIFICATION. Tests for systems that prevent energy from being fed back into the distribution network. UNE 217001:2020. Madrid: AENOR, 2020. Salicru's private library.
- [6] OFFICIAL JOURNAL OF THE EUROPEAN UNION. Establishes a network code on requirements for connecting generators to the network. UE 2016/631 of 14 April 2016. European Commission. Salicru's private library.