



EL MÉTODO «DROOP» MÁS ALLÁ DEL SIMPLE PARALELADO DE SAIS

Por Albert Marzábal
Chief Control Systems Engineer en SALICRU
Por Josep M. Guerrero
Department of Energy Technology, Universidad de Aalborg
Por Juan C. Vasquez
Department of Energy Technology, Universidad de Aalborg

Introducción	3
Ventajas e inconvenientes de paralelar generadores de tensión	4
Métodos de paralelado	5
Centralizados	5
Distribuidos	7
Descentralizados	8
Generadores síncronos virtuales: el método de caída de frecuencia/amplitud «droop»	9
El concepto de “Impedancia Virtual”	11
Lazo de compensación secundario	12
Conclusiones	13
Referencias	14

Introducción

Este “white paper” presenta los métodos fundamentales para controlar sistemas de alimentación ininterrumpida (SAIs) conectados en paralelo, especialmente la evolución de los métodos basados en el control “droop”. Los SAIs protegen los equipos contra problemas del suministro eléctrico como desconexiones temporales, microcortes, picos de tensión así como a variaciones de frecuencia. El dimensionado del SAI en potencia (kVA), debe hacerse en base a las estimaciones de consumo de potencia máxima de los equipos a proteger, incluyendo las previsiones futuras de ampliación. Esta estimación debe hacerse lo más ajustada posible para reducir el coste de la instalación pero también debe ser suficientemente amplia para absorber las futuras ampliaciones.

Aunque no el único, el ejemplo paradigmático donde esta situación es especialmente difícil de estimar son los “data centers”, sistema de múltiples servidores como google, microsoft, facebook, etc. El mismo “data center” puede tener unos requerimientos iniciales de potencia muy pequeños, por ejemplo 50 kVA, pero se pueden ir aumentando hasta llegar a un factor de 20 o más (1 MVA), la estimación inicial. Cuando las diferencias entre instalación inicial y estimación futura son tan grandes, se impone por necesidad, un sistema de dimensionado escalable donde los SAIs se puedan añadir en paralelo sin grandes o ningún cambio en la instalación inicial. Para conseguir escalabilidad con fiabilidad es necesario desarrollar sistemas de paralelado de SAIs mas allá de simples sistemas centralizados.

Este documento hace un repaso de los sistemas de control utilizados para conseguir paralelado de SAIs comparando la funcionalidad y prestaciones de cada solución. La organización de este documento se detalla a continuación: en el siguiente punto se repasan brevemente las ventajas e inconvenientes del paralelado de generadores de tensión. Seguidamente se describen los métodos más utilizados para resolver la compartición de corriente. El siguiente punto detalla el método “droop” convencional, después el uso de la impedancia virtual para mejorar la robustez y finalmente, la mejora de las prestaciones del control “droop” mediante un lazo externo no crítico y comunicaciones de reducido ancho de banda. Aunque la descripción de los métodos aquí tratados es de aplicación genérica, este documento se ha confeccionado teniendo en mente las características específicas de los SAIs.

Ventajas e inconvenientes de paralelar generadores de tensión

La conexión en paralelo de generadores, respecto a un generador único, presenta una serie de conocidas ventajas en escalabilidad, rendimiento y fiabilidad, detalladas a continuación:

- **Escalabilidad** ya que permiten añadir o quitar módulos o equipos a medida que se vayan modificando los requerimientos de potencia globales. Esto permite no tener que sobredimensionar el sistema en la fase inicial del proyecto, y ajustarse a los requerimientos iniciales con la certeza que se podrá aumentar la potencia en fases posteriores simplemente añadiendo más elementos en paralelo.
- **Alto rendimiento** porque permite repartir las necesidades de potencia suministrada entre los equipos de forma que la mayoría de ellos trabajen en su punto de rendimiento óptimo, mejorando el rendimiento global y lo que también es importante en un margen más amplio de potencias suministrada.
- **Fiabilidad** ya que permite fácilmente la adición de módulos o equipos con el fin de configurar sistemas redundantes donde la falla de un módulo pueda ser automáticamente sustituida por el redundante sin perjuicio de suministro ni prestaciones.

Aún conocidas estas ventajas, el paralelado de fuentes de tensión presenta una dificultad inherente a la misma definición de fuente de tensión ya que de forma ideal deben mantener la tensión con independencia de la corriente que suministra, o lo que es lo mismo, impedancia de salida nula. En la práctica, cuando conectamos múltiples fuentes de tensión en paralelo, pequeñas diferencias de tensión (y/o fase en corriente alterna) producirán grandes diferencias de corriente. En el caso de corriente alterna, además, deben estar perfectamente sincronizadas y generar la misma forma de onda sin distorsión armónica, para mantener frecuencia, fase y amplitud.

Aunque es cierto que en la práctica los equipos tienen una cierta impedancia no nula, los problemas del paralelado aumentan con las prestaciones del equipo, o lo que es lo mismo, tener altas prestaciones de un equipo "standalone" pueden ser contraproducentes cuando se trata de conectar varios equipos en paralelo. En la práctica las tensiones de salida no serán idénticas debido a las tolerancias de los sensores de tensión y su electrónica de acondicionamiento asociada. Y como no serán iguales en fase y amplitud, provocaran la aparición de corrientes circulantes entre módulos, ocasionando la reducción de la eficiencia global del sistema o incluso que algunos de los inversores se comporten como rectificadores, absorbiendo energía que podría comprometer las tensiones del DC link de los SAIs.

Por lo expuesto hasta aquí, y a efectos prácticos, se hace inviable la conexión directa de generadores de tensión sin algún método de control de repartimiento de corrientes. A continuación se detallan los métodos de control para el repartimiento de corriente más habituales que se han podido llevar a cabo, en parte, gracias al avance en los procesadores de señal digital (DSP), que permiten implementar algoritmos complejos a un precio razonable.

Métodos de paralelado

Tres grandes grupos de técnicas de paralelado se diferencian según el método de interconexión de equipos que están relacionados con los conceptos de control centralizado, distribuido o descentralizado.

Centralizados

Este primer grupo se basa en el concepto de un control central, en algún sitio del sistema, que monitoriza y consigna al resto de subsistemas en tiempo real y necesita por tanto, una comunicación de alta velocidad y tiempo real entre el nodo central y los subsistemas.

El sistema básico centralizado se basa en un solo control que envía la misma señal de control a todos los módulos por igual. El problema que presenta este esquema de control es que la equalización de corrientes depende de que los parámetros de las etapas de potencia de los equipos sean lo más parecidos posible, lo cual no siempre es posible dada las dispersiones de los valores de los filtros de salida.

Para solventar este problema, a menudo se proponen esquemas de maestro-esclavo (figura 1), en los que el módulo maestro actuará como fuente de tensión, fijando frecuencia, fase y amplitud, mandando el valor de su corriente de salida como referencia de corriente (i^*) para cada uno de los módulos esclavos (figura 2).

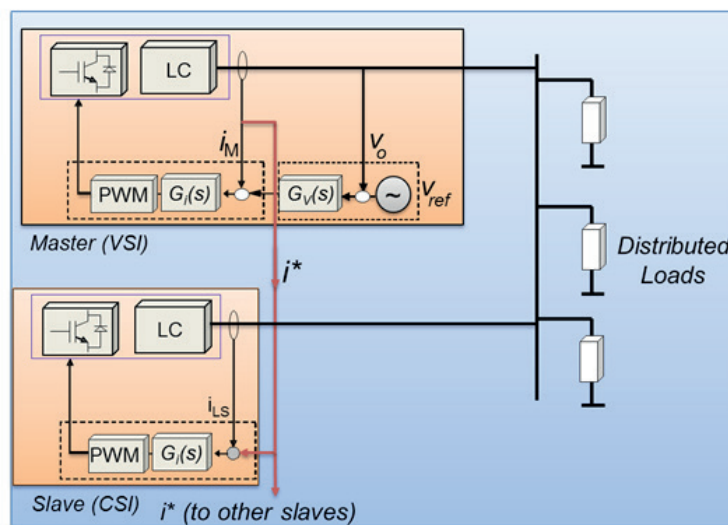


Fig 1. Control maestro-esclavo: un inversor se comporta como fuente de tensión y el resto como fuentes de corriente que copian la corriente de salida del maestro

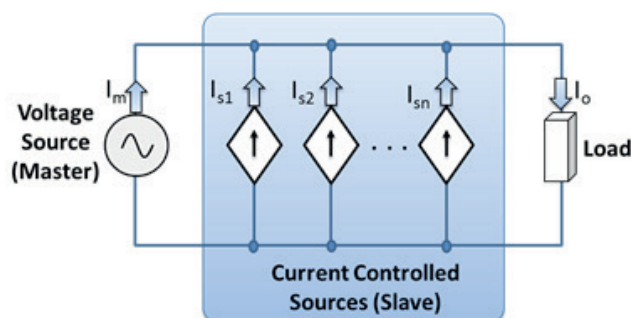


Fig 2. Circuito equivalente de la estrategia maestro-esclavo

Este esquema proporciona muy buenas prestaciones ya que al actuar como un solo sistema monolítico, mantiene las prestaciones individuales, pero padece de dos problemas: por una parte de pérdida de robustez por caída de comunicaciones y/o del módulo maestro y por otra parte de pobre escalabilidad debido a la crítica dependencia de las comunicaciones que deben ser de tiempo real y de alta velocidad.

El primer problema del esquema maestro-(multi)esclavo es que, al contrario de la caída de un esclavo, la caída del maestro es definitiva para la caída de todo el sistema. Para evitar esta dependencia del sistema al maestro puede diseñarse un sistema de gestión de maestro rotativo donde todos los elementos pueden adoptar una de las tres funcionalidades: "maestro", "esclavo normal" y "esclavo, maestro de reserva" (figura 3).

En caso de caída del maestro, el "esclavo, maestro de reserva" toma el mando consignando las referencias de tensión. El siguiente "esclavo normal" pasa a ser el "esclavo, maestro de reserva". Este sistema necesita de unas comunicaciones en anillo porque todos los elementos deben estar seguros que cual es su función en el sistema.

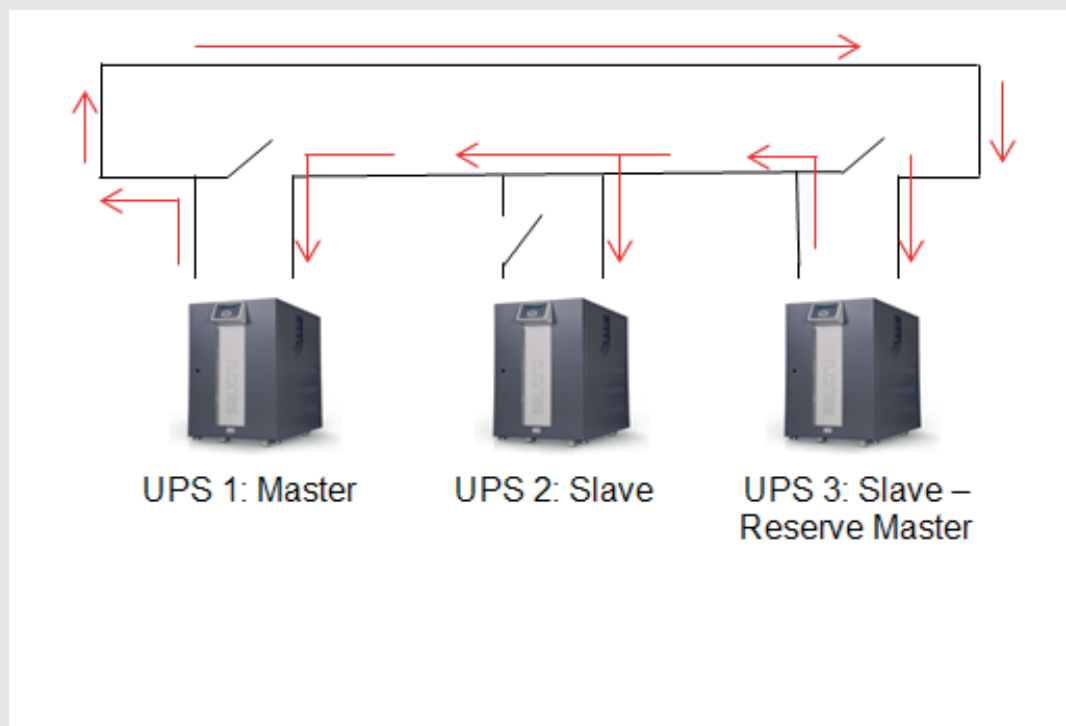


Fig 3. Para evitar la dependencia de un solo elemento, la asignación de maestro puede (y debe) rotar entre los elementos permaneciendo siempre un esclavo como maestro de reserva listo para tomar el control

Distribuidos

El segundo grupo se basa en el concepto de control distribuido, de forma que cada elemento hace su aportación en función de sus medidas locales, utilizando las comunicaciones para ponerse de acuerdo con el resto de individuos del sistema.

Una solución de este tipo consiste en promediar las corrientes (figura 4) o potencias (figura 5) de cada módulo ajustando así la corriente/potencias de referencia de cada uno de ellos. En el caso de las corrientes instantáneas se hace difícil ya que precisa de comunicaciones con un gran ancho de banda. Sin embargo, usando las potencias activa y reactiva es posible usar comunicaciones con ancho de banda reducidos ya que las potencias se pueden promediar en cada ciclo de red sin pérdida acusada de prestaciones.

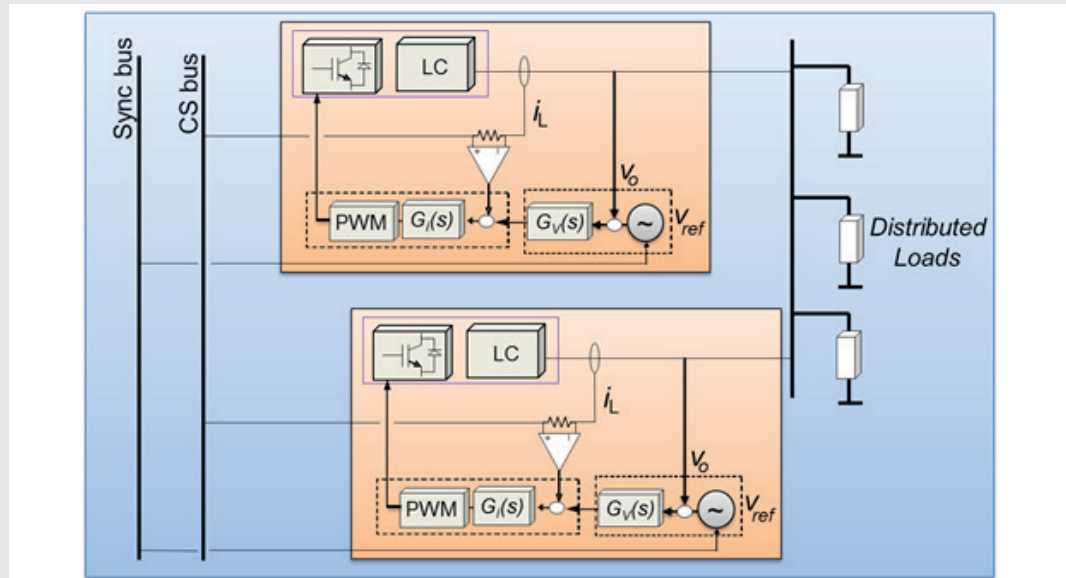


Fig 4. Control de corriente promediada

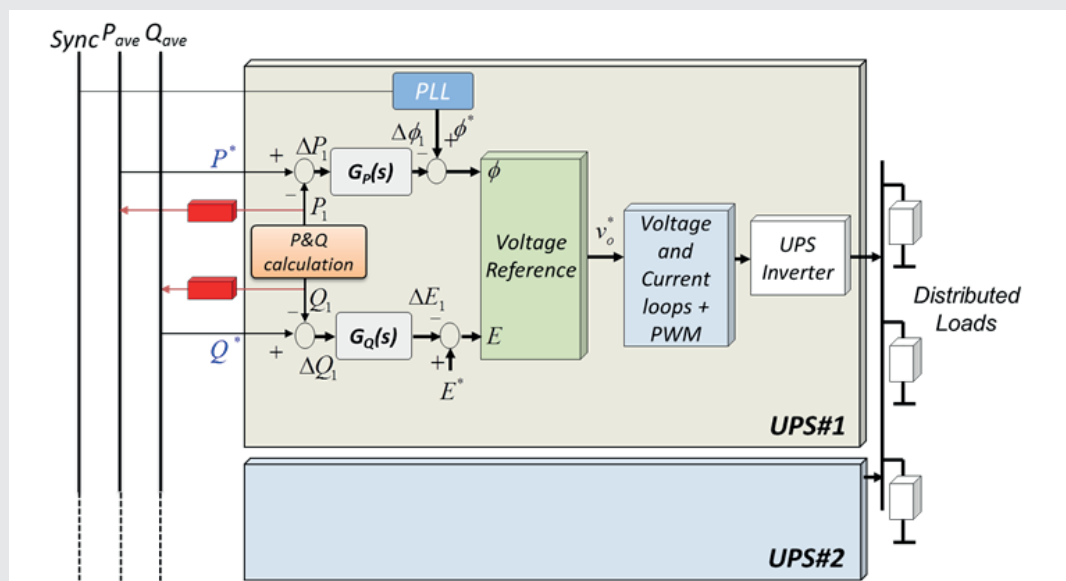
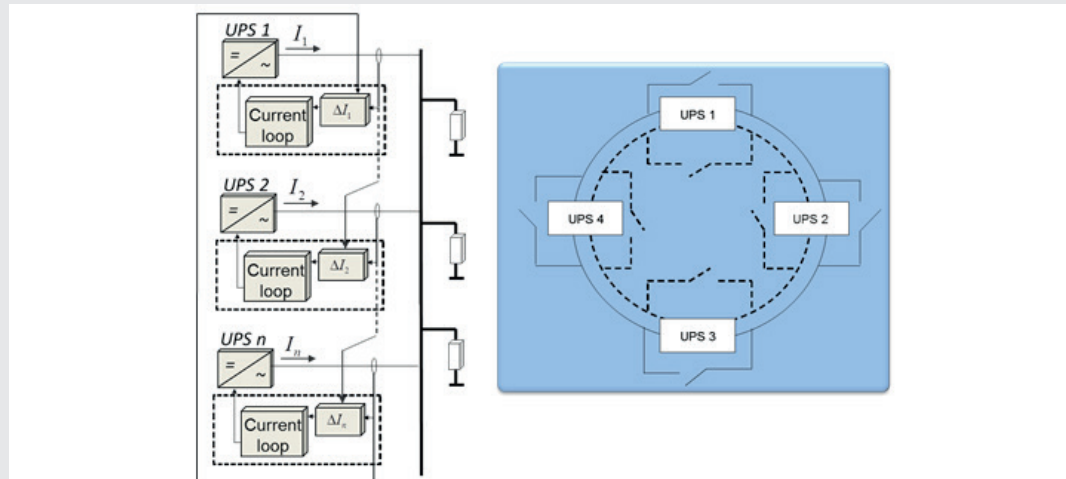


Fig 5. Control de potencia promediada

Alternativamente, se puede implementar un control de corriente circular (figura 6), de forma que las corrientes de referencia se mandan al módulo contiguo. La caída de un módulo implicaría el bypass de la información al módulo inmediatamente precedente. La implementación de este método está condicionada a la arquitectura de potencia, siendo conveniente en anillos seguros que alimenten cargas críticas. Asimismo, el uso de comunicaciones en forma de daisy-chain es recomendable para este tipo de estructuras.

Fig 6. Control en Cadena de Corriente (CCC) para anillos seguros de potencia y comunicaciones en Daisy-chain



Descentralizados

El tercer grupo se basa en el concepto de control descentralizado, de forma que cada elemento hace su aportación en función exclusivamente de sus medidas locales (sin comunicaciones) pero configurado para que el comportamiento individual genere sinergias de forma natural al conectarse al grupo. Esto se consigue conceptualmente, con una cierta relajación en la regulación de los objetivos de control y un diseño individual que se avenga bien con el grupo.

En esencia estamos hablando del método "droop" y en el caso de generadores de corriente continua, consiste en el ajuste de la tensión en función de la corriente de salida. Para el caso de corriente alterna, consiste en el ajuste de tensión y frecuencia de salida en función de la potencia activa y reactiva suministrada por el inversor.

El método convencional "droop" proporciona alta fiabilidad y escalabilidad pero a costa de reducir prestaciones:

- Respuesta dinámica lenta
- Compromiso inherente entre desviaciones de amplitud y frecuencia y reparto de corrientes/potencias.
- No actúa sobre la potencia de distorsión, por lo que no equilibra las corrientes armónicas en el caso de alimentar cargas no lineales de tipo rectificador.
- Alta dependencia con la impedancia de salida del inversor.

Además la impedancia de la línea es desconocida por lo que puede resultar en desajustes en el balanceado de la potencia reactiva.

Como se verá más adelante, los problemas del "droop" convencional se pueden solventar con refinamientos posteriores como añadir comunicaciones (no críticas) por medio de la inyección de señales de alta frecuencia en las líneas de potencia o bien con unas comunicaciones explícitas externas no críticas. Las señales pueden venir dadas por un controlador superior centralizado o distribuido. De este modo, este método de control se puede hibridar con los dos anteriores.

El estudio de todos estos refinamientos del método "droop" convencional, para conseguir un sistema descentralizado, escalable, robusto y preciso, es el objetivo final de este documento y pasa a detallarse a continuación.

Generadores síncronos virtuales: el método de caída de frecuencia/amplitud «droop»

La idea detrás de este método es obtener fuentes de tensión que emulen el comportamiento de generadores síncronos, de ahí que también se conozca el concepto como generadores síncronos virtuales. En los generadores síncronos reales, debido a las inercias que incorporan, cuando la potencia que requieren se incrementa, su frecuencia se reduce, reduciendo a su vez el ángulo de potencia. Debido a este principio fundamental, los generadores conectados en paralelo encuentran de forma natural, un punto común de operación y comparten la potencia requerida por las cargas conectadas al sistema eléctrico.

Este principio se ha utilizado durante décadas para conectar generadores a la red eléctrica sin requerir intercambio de información entre ellos. La red eléctrica tal y como la conocemos hoy se compone por múltiples generadores síncronos conectados en paralelo. Este comportamiento, imperfecto desde el punto de vista de generador de tensión, pero deseable desde el punto de vista del paralelado práctico, es el que se ha buscado implementar en los convertidores de potencia electrónicos.

Al contrario que los generadores síncronos, los SAIs, siendo generadores basados en electrónica de potencia, no incorporan ningún tipo de inercia. Aun así, es posible que los inversores de salida de los SAIs emulen estas inercias mediante una relajación de la regulación de frecuencia (ω) y amplitud de la tensión de salida en función de las medidas de las potencias activa y reactiva locales.

De este modo, si un equipo tiene una tendencia inicial a sobrecargarse, al permitir una caída («droop») de tensión en función de la corriente, la diferencia de esta con las corrientes de los otros equipos tiende a repartirse mejor y reducir por tanto las corrientes circulantes.

En la figura 7 se muestra el efecto de la caída («droop») de frecuencia (ω) de los generadores de potencia de gran escala cuando se incrementa la demanda de potencia (P), tal como se ha descrito, para emular la característica inercial de los generadores síncronos.

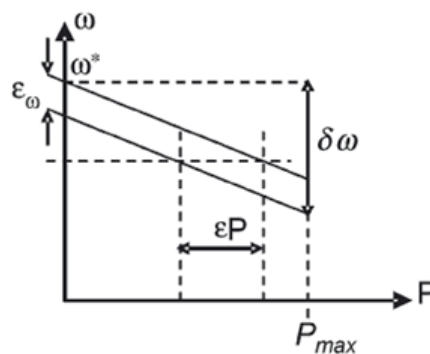


Fig 7. Efecto en el reparto de potencias entre dos equipos debido a la relajación en la regulación de frecuencia

Al conectar en paralelo dos equipos con dos perfiles diferentes (separados $\epsilon\omega$) la frecuencia será común (línea horizontal) y las potencias repartidas estarán separadas ϵP . Nótese que el método de caída de frecuencia acerca potencias pero no las iguala y que estarán más cerca cuando más pronunciada sea la caída "droop" $\delta\omega$. Es decir que la precisión en repartición de potencia se consigue a costa de reducir precisión en la regulación de frecuencia.

La utilización de "droop" en frecuencia, junto con el "droop" de amplitud está relacionado con las potencias activa i reactiva, lo que permite establecer una relación de control de las potencias a través de la frecuencia y la amplitud. Fig. 8.

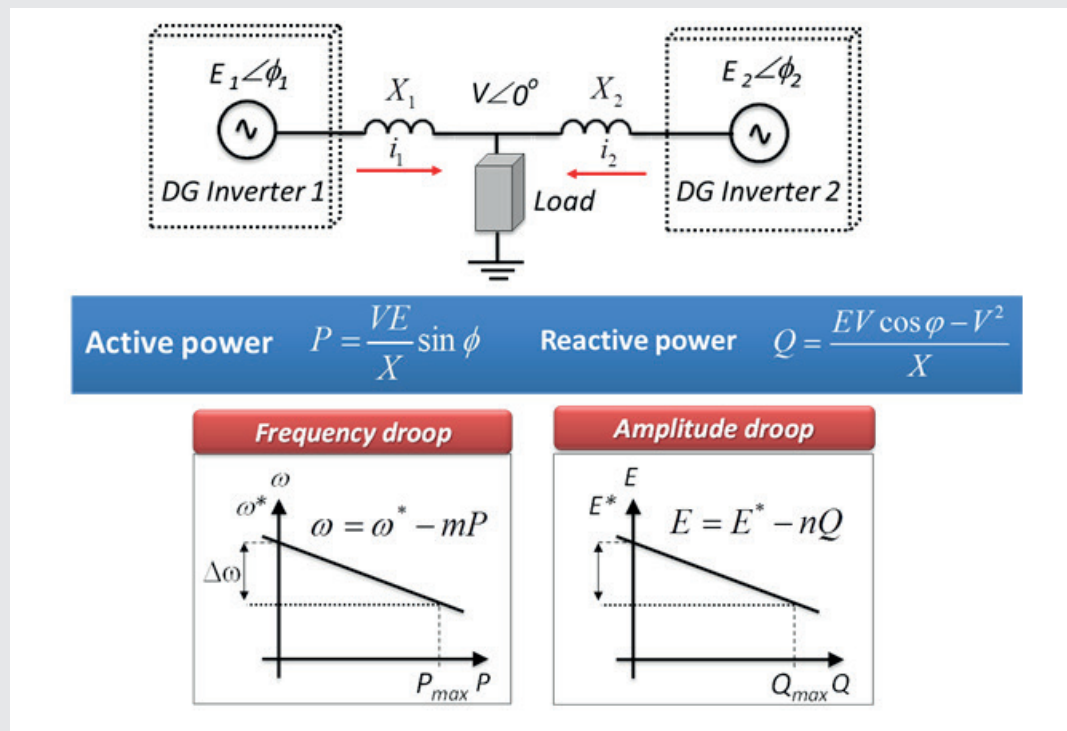


Fig 8. "Droop" de frecuencia y amplitud para líneas predominantemente inductivas

La asunción de carácter inductivo del análisis anterior es válida en líneas de alta tensión o redes con generadores síncronos, ya que su componente reactiva es muy elevada. Sin embargo esto no es cierto para líneas de baja tensión, ya que son principalmente resistivas, y mucho menos cuando se utilizan equipos de electrónica de potencia sin transformadores de salida, como es el caso de la mayoría de SAIs (tabla 1).

Type of line	R' Ω/km	X' Ω/km	I_N A	$\frac{R'}{X'}$
low voltage line	0.642	0.083	142	7.7
medium voltage line	0.161	0.190	396	0.85
high voltage line	0.06	0.191	580	0.31

Tabla 1. Parámetros de línea típicos

El concepto de “Impedancia Virtual”

El análisis anterior se ha hecho bajo el supuesto de inductancia dominante en la línea de interconexión de potencia pero no tiene por qué ser necesariamente cierto siempre. El no cumplimiento de este supuesto en la impedancia real de la línea tiene un efecto negativo considerable sobre el funcionamiento del método de caída, sobre todo en la precisión en reparto de potencias.

TABLE I
OUTPUT IMPEDANCE IMPACT OVER POWER FLOW CONTROLLABILITY

Output impedance	$Z = jX$ (inductive: $\theta = 90^\circ$)	$Z = R$ (resistive: $\theta = 0^\circ$)
Active power (P)	$P = \frac{EV}{X} \sin\varphi \cong \frac{EV}{X} \varphi$	$P = \frac{EV \cos\varphi - V^2}{R} \cong \frac{V}{R}(E - V)$
Reactive power (Q)	$Q = \frac{EV \cos\varphi - V^2}{X} \cong \frac{V}{X}(E - V)$	$Q = \frac{EV}{R} \sin\varphi \cong -\frac{EV}{R} \varphi$
Frequency droop (ω)	$\omega = \omega^* - mP$	$\omega = \omega^* + mQ$
Amplitude droop (E)	$E = E^* - nQ$	$E = E^* - nP$
m	$\delta\omega/P_{nom}$	$\delta\omega/2Q_{nom}$
n	$\delta E/2Q_{nom}$	$\delta E/P_{nom}$

Tabla 2. Impacto de la impedancia de salida sobre las ecuaciones de transferencia

La tabla 2 revela el impacto del carácter inductivo o resistivo de la impedancia de entrada sobre las relaciones entre potencias fases y amplitudes. En dicha tabla se observa que las relaciones entre potencia activa y fase (impedancia reactiva inductiva) intercambian sus roles cuando el carácter de la impedancia es puramente resistivo. Lo mismo puede observarse con la otra relación.

Con el fin de asegurar una impedancia fija en el inversor (ya sea inductiva/resistiva), se implementa un lazo adicional de control que simula una impedancia de salida en el inversor para que el sistema “vea” la misma impedancia, normalmente diseñada para ser mucho mayor que la impedancia de la línea. Fig.9.

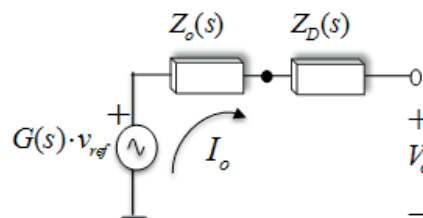


Fig 9. Circuito equivalente de la impedancia en lazo cerrado del inversor

Además, la impedancia virtual también puede jugar un papel importante cuando se trata de repartir armónicos de corriente, ya que se puede fijar la impedancia armónica vista por el generador de forma individual (por armónico) o en un rango de frecuencias especificados. Siempre teniendo en cuenta el inherente compromiso de diseño entre reparto de corrientes armónicas y distorsión armónica de tensión.

Un esquema general de lazos de control con el “droop” convencional, control en cascada interno e impedancia virtual se muestra en la Fig.10.

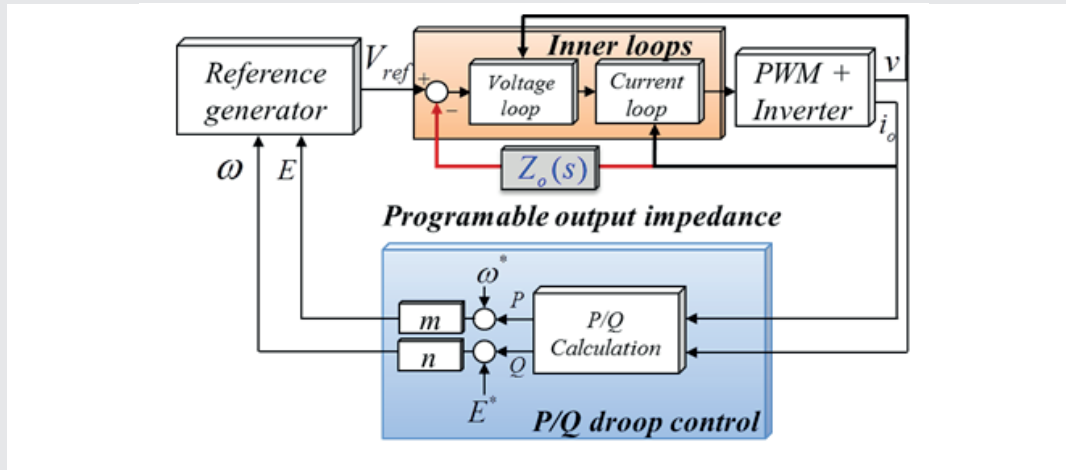


Fig 10. Esquema completo de lazo compuesto por control en cascada con "droop" e impedancia virtual

Lazo de compensación secundario

Sin ningún otro algoritmo, el sistema "droop" con el lazo de impedancia virtual mantiene la necesidad de establecer y asimilar un compromiso entre frecuencia y reparto de potencia por un lado y de amplitud y regulación de fase por otro. Este sistema está totalmente exento de comunicaciones y es totalmente autónomo. El precio a pagar es la "caída" en frecuencia y en amplitud que es un parámetro de diseño. No obstante, con un sistema de comunicaciones no crítico y no necesariamente rápido se puede implementar un lazo de compensación adicional externo para corregir la caída en todas las consignas de tensión control. Fig.11

Este lazo solo compensa el porcentaje de "droop" de diseño para obtener error cero en estado estacionario. Fig.12. El sistema puede ser lento y utilizar comunicaciones no críticas ya que una interrupción en la comunicación tendrá como resultado un error pequeño (parámetro de diseño del "droop", habitualmente cercano al +/-1%, es decir +/-0.5Hz). El lazo secundario se puede implementar mediante un controlador central o distribuido a lo largo de los controladores locales de cada uno de los SAIS.

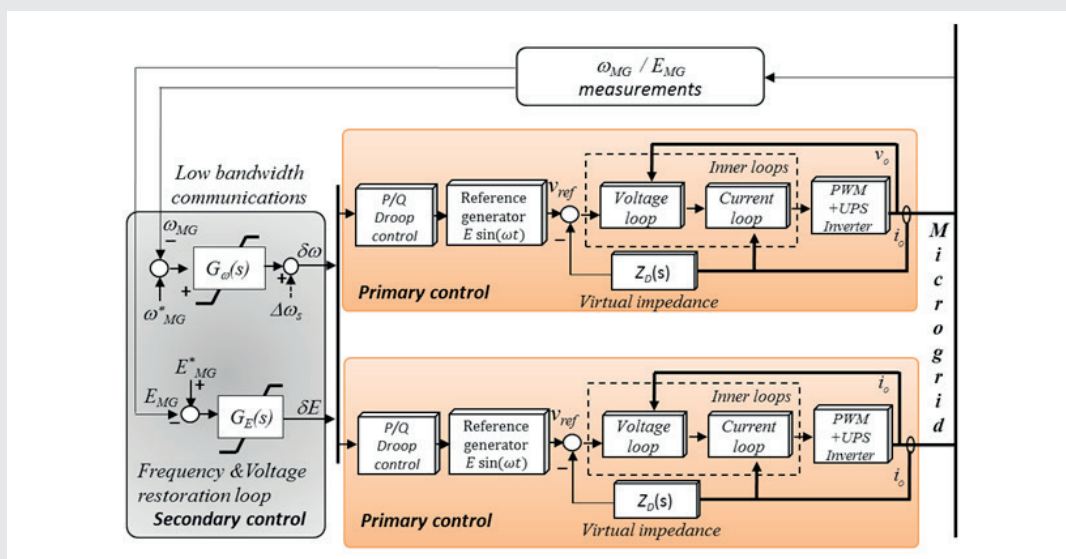


Fig 11. Implementación del control secundario centralizado para la restauración de frecuencia y amplitud de la tensión de salida

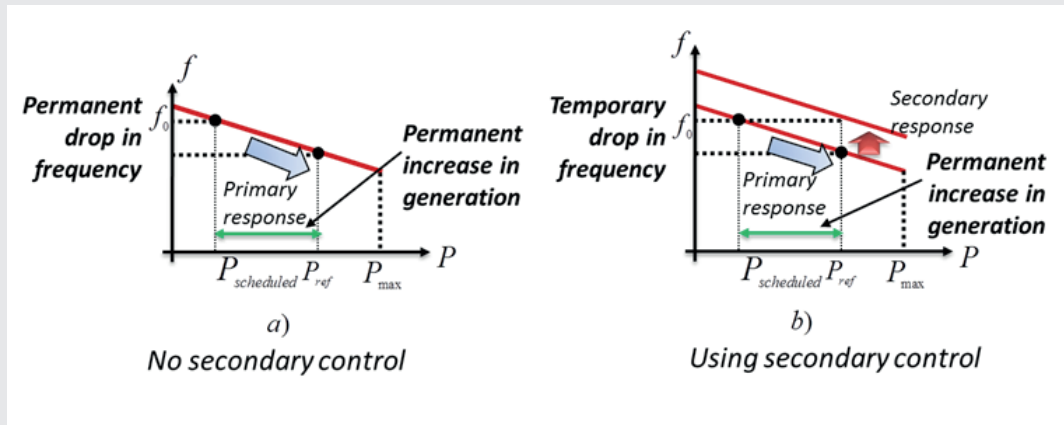


Fig 12. Acción del lazo de control secundario para restaurar la frecuencia del sistema

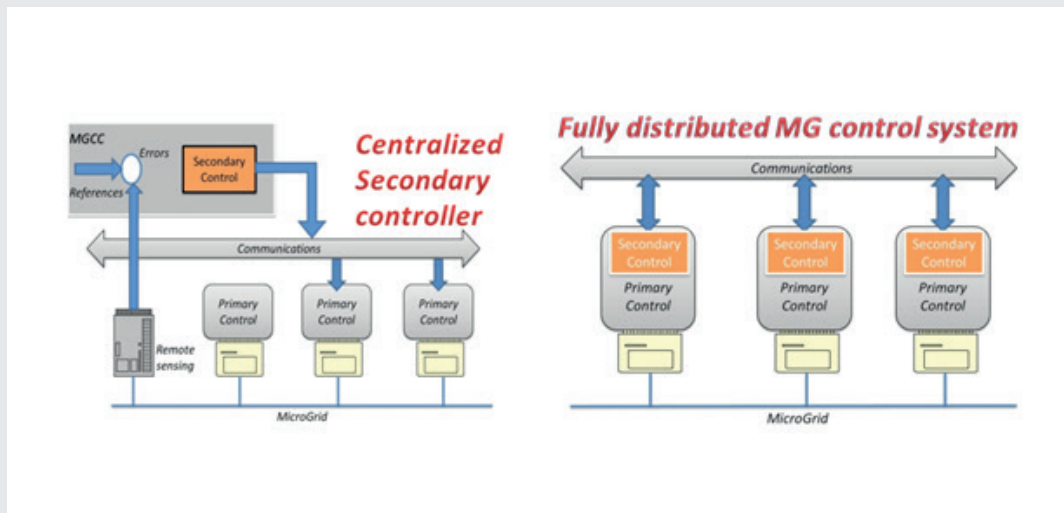


Fig 13. Implementación del lazo de control secundario mediante un controlador centralizado y otro distribuido

Aunque el control centralizado en el lazo secundario es perfectamente asumible y funcional, hace perder el concepto de sistema descentralizado basado en “droop” y debe volverse a valorar la idoneidad de centralizar o no este segundo lazo. Fig.13.

Conclusiones

Se han visto las más relevantes estrategias de control de SAIs en paralelo: centralizada, distribuida y descentralizada.

La estrategia centralizada convencional tiene buenas prestaciones pero una fuerte dependencia de las comunicaciones y de la fiabilidad del maestro por lo que consecuentes variantes intentan reducir esta dependencia con estrategias de maestro rotatorio i/o compartición de información (votación). De todas formas la dependencia crítica de las comunicaciones no puede solventarse fácilmente por lo que, en general, el aumento en la cantidad de nodos va en detrimento de las ventajas iniciales del paralelado: fiabilidad, escalabilidad y rendimiento del sistema global.

La estrategia distribuida convencional, solventa esta falta de fiabilidad permitiendo la interconexión de grandes cantidades de elementos pero a costa de pérdida de prestaciones que pueden compensarse con la implementación de la impedancia virtual y las comunicaciones externas no críticas.

Prestaciones	Control de corriente promediada	Control de potencia promediada	Control de caída "Droop"
Nº señales de control	1 sincronización + CS/2 PS bus	1 sincronización + 2 PS bus	0 o bajo ancho de banda
Distorsión armónica de Tensión	Bajo	Alto	Medio
Reparto de corrientes armónicas	Bueno	Limitado	Limitado
Dinámica	Rápida	Lenta	Lenta
Compromiso entre regulación y compartición de corrientes	Alto	Alto	Pobre
Modularidad	Media	Media	Alta
Redundancia	Media	Media	Alta

Tabla 3. Estrategias de compartición de carga activa frente a controladores "Droop"

Lazo de control	Control Centralizado	Maestro-Esclavo	Potencia/ Corriente promediada	3C
Centralizado	✓	✓	=	=
Distribuido	✗	✗	✓	✓

Tabla 4. Lazo de tensión para estrategias activas de reparto de corriente/potencia

Referencias

- [1] R. Ciarans, SAIS Modulares: ¿Son Realmente más Fiables? SALICRU whitepapers, 2015.
- [2] M.H.T. Bollen, Understanding Power Quality Problems. Voltage Sags and Interruptions. New York: Wiley, 2000.
- [3] W. Sölter, "A new international UPS classification by IEC 62040-3," in Proc. IEEE Telecommunications Energy Conf, pp. 541–545, 2002.
- [4] A. King and W. Knight, Uninterruptible Power Supplies and Standby Power Systems. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [5] A. Kusko and S. Fairfax, "Survey of rotary uninterruptible power supplies," in Proc. IEEE Telecommunications Energy Conf., Boston, MA, pp. 416–419, Oct., 1996.
- [6] R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, S. Santoso, and H.W. Beaty, Electrical Power System Quality. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [7] S. Karve, "Three of a kind," IEE Rev., vol. 46, no. 2, pp. 27–31, Mar. 2000.
- [8] S.B. Bekiarov and A. Emadi, "Uninterruptible power supplies: Classification, operation, dynamics, and control," in Proc. IEEE APEC'02, Dallas, TX, pp. 597–604, 2002.
- [9] Guerrero, J.M.; Hang, L.; Uceda, J.; "Control of Distributed Uninterruptible Power Supply Systems," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Volume: 55, Issue: 8, 2008.