

Teacher`s Booklet

Powered by:  **Workrooms Journal**
on Power Electronics, Renewable Energy and Energy Efficiency
ISSN: 2386-2483

Entendiendo las estrategias de control “droop” para la regulación de buses de continua en sistemas electrónicos de potencia.

DOI: <http://dx.doi.org/10.15592/tb.2022.0001>

Autor:

Manuel Rico-Secades (orcid-ID: <https://orcid.org/0000-0002-5372-0330>)

EPI-Gijón

jueves, 24 de febrero de 2022

1.- Introducción a la problemática.

Un sistema electrónico de potencia (SEP) es un sistema en continuo equilibrio dinámico donde los elementos que generan energía, los que consumen energía y los que tienen capacidad de almacenarla deben de ser capaces de equilibrar de forma instantánea los balances de potencia para mantener el equilibrio del sistema y los márgenes de operación de mismo.

Los SEP toman mucha importancia dado el auge imparable de las energías renovables y del almacenamiento de energía. El mundo de la Ingeniería Eléctrica, va incorporándose poco a poco estrategias de Electrónica de Potencia y gusta denominar a estos sistemas como Microrredes Inteligentes.

OBJETIVO: El objeto de este documento es muy concreto y busca explicar y comprender cómo las estrategias de control que se denominan con la terminología inglesa “droop”, permiten estabilizar un SEP trabajando sobre una red de continua (o bus de continua).

Además, trataremos de justificar como su implementación permite, de una forma sencilla, repartir el trabajo entre los distintos módulos de almacenamiento de energía (eualización).

Para introducir el tema, en la Fig. 1 tenemos un Sistema Electrónico de Potencia (SEP) sobre un bus de continua utilizando una representación simplificada, en forma de fuente de corriente, de un elemento de generación de energía y otro de consumo de energía.

Estas representaciones simplificadas facilitan la comprensión del funcionamiento del sistema y nos permiten introducirnos en las estrategias de control que posteriormente debemos implementar las topologías de Electrónica de Potencia que utilicemos.

En la propia figura se indica que existe una cierta capacidad (C_{bus}) conectada al bus de continua, que para el objeto de esta explicación puede dejarse indeterminada y que únicamente afecta a la dinámica de carga y descarga de la tensión del bus de continua (V_{bus}).

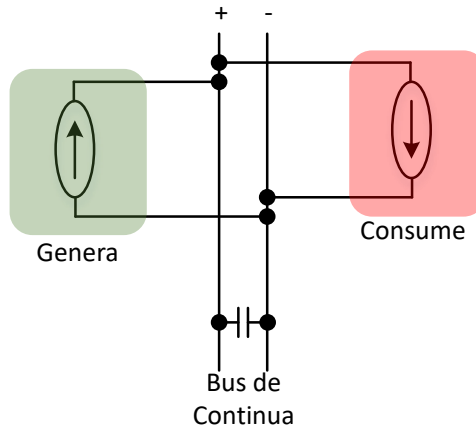


Fig. 1 Un Sistema Electrónico de Potencia sobre un bus de continua con una representación simplificada de un elemento de generación y un elemento de consumo de energía.

Resulta evidente que:

- Si la generación es mayor que el consumo la tensión de bus aumenta (V_{bus} crece, el condensador se carga).
- Si la generación es menor que el consumo la tensión de bus disminuye (V_{bus} disminuye, el condensador se descarga).
- Solamente si el consumo igual a la generación la tensión de bus permanecerá estable (V_{bus} estable).

Podemos acordar una zona de trabajo acotada por una tensión de bus máxima (V_{bus_max}) y una tensión de bus mínima ($V_{bus_mín}$). Ver Fig. 2. Para ello:

- Si $V_{bus} > V_{bus_max}$ se debe de detener la generación (la tensión del bus no puede seguir subiendo).
- Si $V_{bus} < V_{bus_mín}$ se debe de detener el consumo (la tensión de bus no puede seguir bajando).

De esta forma, la tensión del bus de continua podría mantenerse dentro de una acordada zona de trabajo.

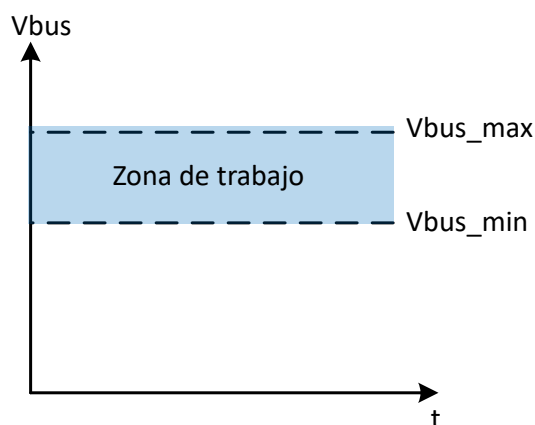


Fig. 2 Zona de trabajo acordada.

La Fig. 3 representa gráficamente las estrategias de operación que deben de mantener los sistemas de generación y consumo para poder mantener la tensión de bus dentro de determinados límites. De esta forma sería posible mantener la tensión del bus (V_{bus}) dentro de

unos límites acordados. Todos los sistemas de generación y consumo deben de estar programados para trabajar en estas condiciones.

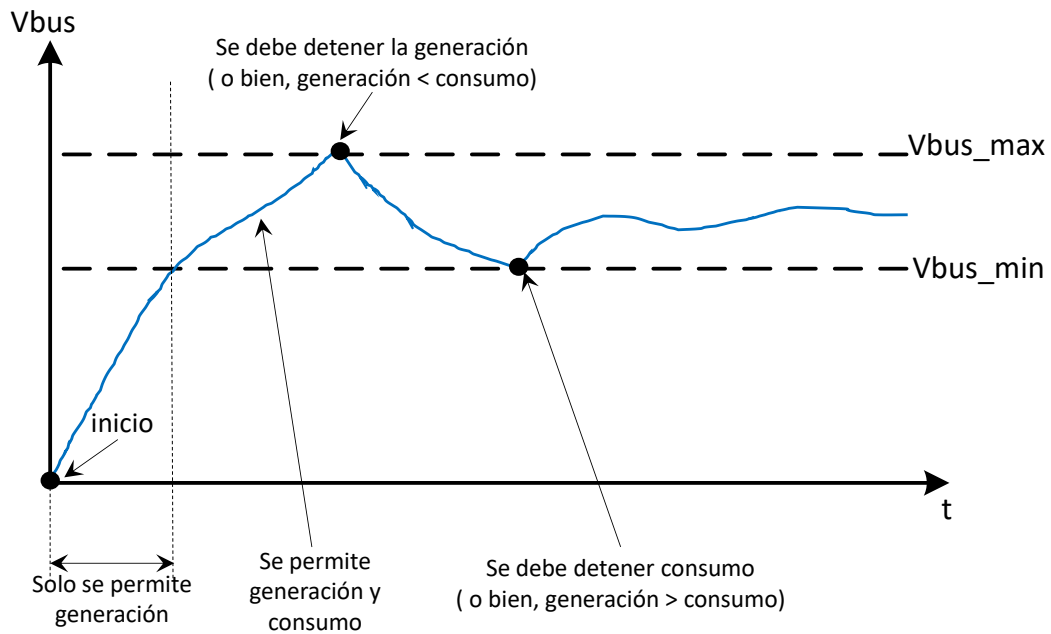


Fig. 3 Estrategias de operación para mantener la tensión de bus dentro de determinados límites (V_{bus_max} - V_{bus_min}).

Obviamente no se puede optimizar la generación (no se puede generar todo lo que se puede) y las cargas podrían quedar sin alimentar en determinados momentos o tendrían que reducir su consumo para adecuarlo a la generación.

Una red así, podría funcionar e incluso regularse, si tenemos capacidad de controlar la generación de energía o si tenemos capacidad de regular el consumo de energía. Pero otras muchas veces la operación sería imposible.

Pensemos por ejemplo en un sencillo alumbrado solar. De noche no hay generación de energía solar y por lo tanto no tenemos energía para encender la luz y al revés, de día podemos tener generación de energía solar, pero no tenemos consumo ya que la iluminación debe permanecer apagada.

Un sistema así, no podría funcionar sin al menos un elemento de almacenamiento de energía. Existen muchas aplicaciones en las cuales no es posible la operación si en el SEP solo existen elementos de generación y consumo. Necesitamos incorporar elementos con capacidad de almacenamiento.

2.- Incorporación del sistema de almacenamiento de energía

Para dar el siguiente paso, incorporamos en el SEP un elemento con capacidad de almacenar/devolver energía cuando se precise. Lo representamos también de forma simplificada mediante una fuente de corriente (I_{bat}) que si es positiva representa que se almacena energía y si es negativa representa que se devuelve energía. Ver Fig. 4.

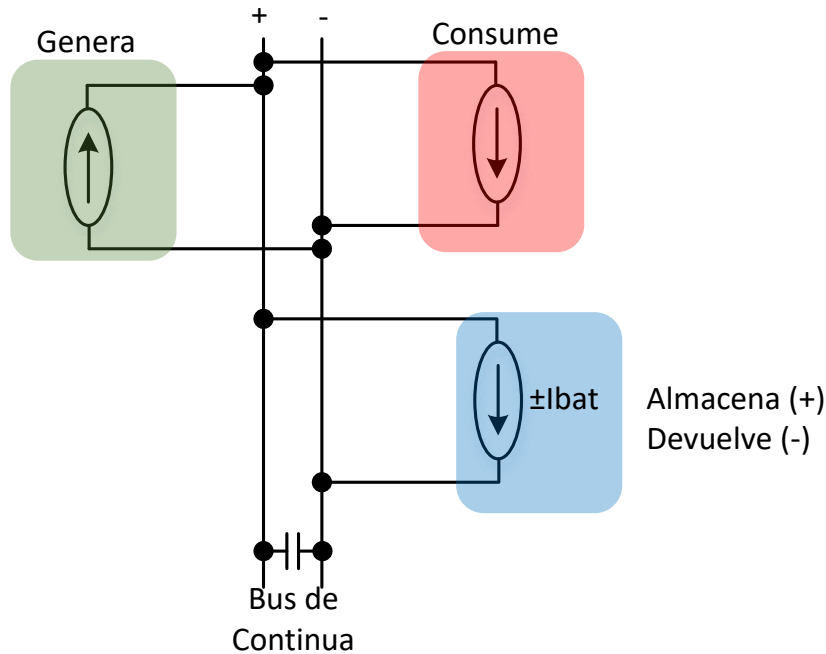


Fig. 4 SEP con almacenamiento de energía.

La clave de funcionamiento es mantener el SEP en equilibrio:

$$\text{Generación} = \text{consumo} + \text{almacenamiento/devolución}$$

- Si genera mayor que consumo, se debe almacenar energía (I_{bat} sería positiva).
- Si genera menor que consumo, se debe devolver energía (I_{bat} sería negativa).

Podemos ver la operación del sistema desde el punto de vista de un sistema de control, con el objetivo de estabilizar la tensión de bus de continua en un valor nominal acordado (V_{bus_nom}).

Una vez acordado en valor de V_{bus_nom} , se puede mantener estable en ese punto. Los valores de V_{bus_max} y V_{bus_min} se pueden mantener como protecciones. Si las baterías (o equivalente con el sistema de almacenamiento de energía utilizado) están totalmente cargadas, ya no es posible más almacenamiento y, por el contrario, si las baterías están totalmente descargadas, ya no podremos devolver energía.

Mientras dispongamos energía suficiente en la batería y estemos dentro de sus rangos de operación, podremos mantener perfectamente regulado el valor de la tensión de bus de continua al valor acordado (V_{bus_nom}).

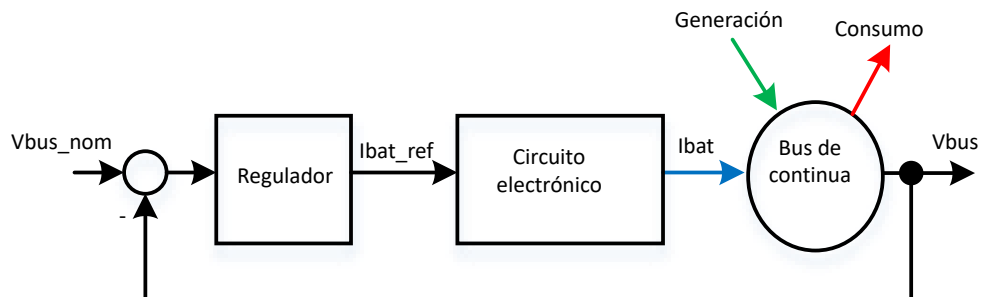


Fig. 5 Operación de un sistema de almacenamiento de energía regulando el bus de continua de un SEP.

Si en lugar de un único elemento generador y un único elemento consumidor hay varios que generan y varios que consumen, el sistema funciona perfectamente con único sistema de almacenamiento de energía.

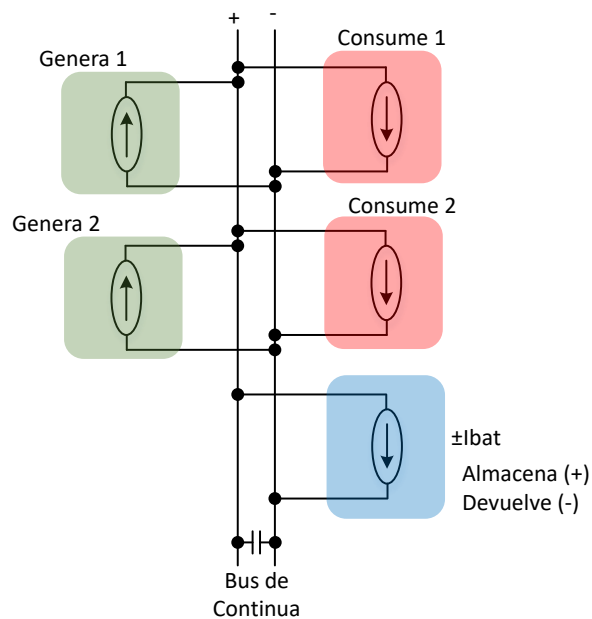


Fig. 6 SEP con varios elementos de generación y varios elementos consumidores.

3.- ¿Qué pasa si deben coexistir varios sistemas de almacenamiento de energía?

Pero, ¿Qué pasa si hay varios elementos con capacidad de almacenar/devolver energía? Por ejemplo, baterías, Supercondensadores, pilas de combustible, etc. ¿Cómo debe funcionar el SEP para una correcta estabilidad del mismo?

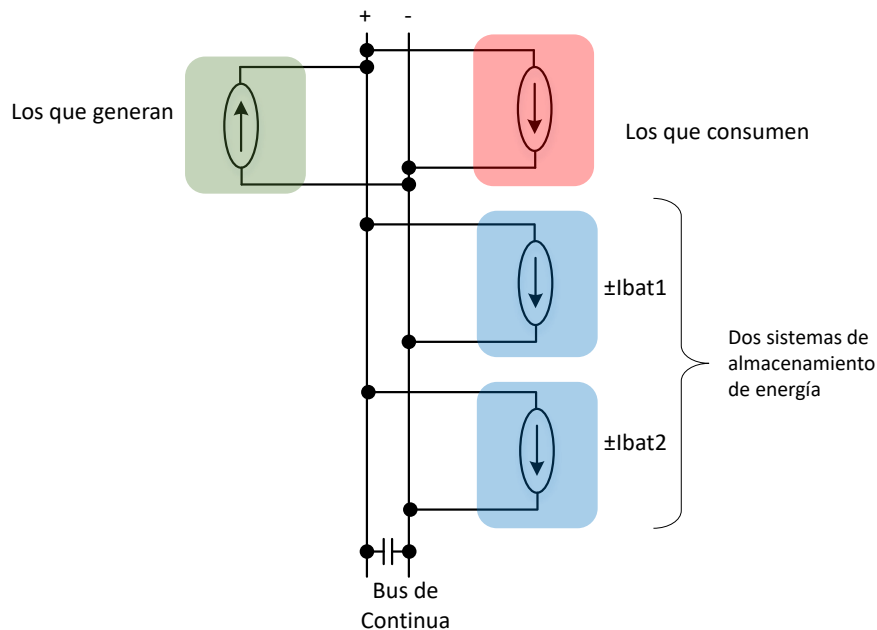


Fig. 7 SEP con dos sistemas de almacenamiento de energía.

Así, la Fig. 7 representa un SEP con dos sistemas de almacenamiento de energía. ¿Quién regula el bus? Resulta evidente que deben realizar el trabajo entre los dos, pero ¿Cómo?

Para comprender como debe funcionar el sistema en estas condiciones, podemos explicar cómo debe ser la operación de los dos sistemas de almacenamiento de energía con ayuda de un diagrama de bloque de control.

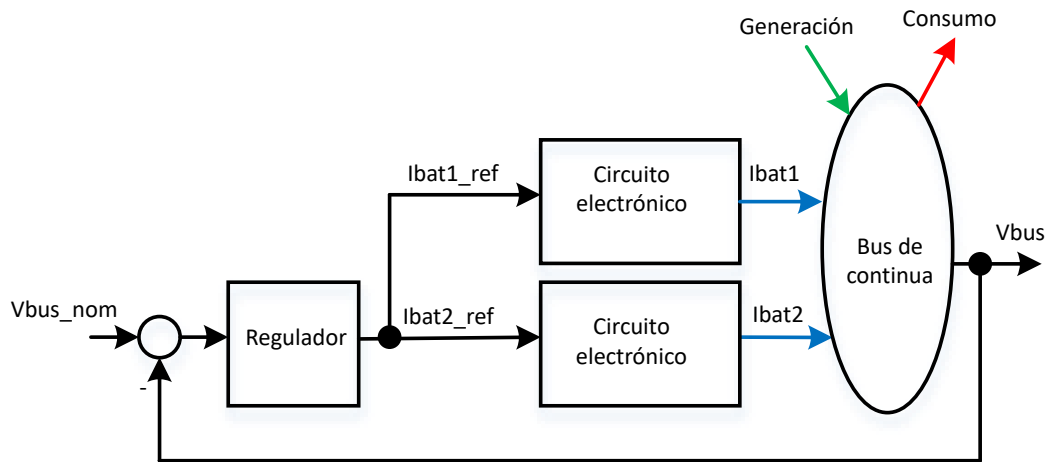


Fig. 8 Operación de un SEP con dos sistemas de almacenamiento de energía.

El regulador de tensión se debe encargar de enviar la referencia de corriente (I_{bus1_ref} e I_{bus2_ref}) a todos los sistemas de almacenamiento de energía, que deben trabajar al unísono para mantener estable el bus de continua al valor acordado (V_{bus_nom}).

Esta forma de proceder se conoce como estrategia maestro-esclavo (master-slave). Un elemento del sistema (Master) se encarga de medir la tensión y regular el sistema (regulador de tensión) enviando la referencia de corriente a cada sistema de almacenamiento (slave). Cada uno de los sistemas de almacenamiento deben pues estar regulados es corriente para poder seguir la referencia de corriente suministrada por el maestro.

Fijarse, que se precisa comunicación entre los módulos, para que cada uno de ellos pueda recibir la referencia de corriente necesaria (¿Qué pasa si están físicamente muy separados?, se podría complicar). Además, los módulos no son todos iguales, hay uno de ellos que es el maestro (master) que si falla todo el sistema deja de funcionar.

La idea expuesta es una opción perfecta para estabilizar perfectamente el bus de continua del SEP. También resulta obvio que se precisa el modelado del sistema para proceder a la regulación del mismo.

La pregunta es: ¿tenemos alguna alternativa para hacer esto mismo de una manera más sencilla y flexible?

La respuesta viene de la mano de lo que se denomina control "droop", que es el principal objetivo de este documento.

4.- Introducción de la estrategia de control "droop"

El término inglés "droop" significa caída y de alguna forma representa simbólicamente que, como veremos, el sistema va a permitir variaciones (caídas y subidas en la tensión de bus de continua).

Para introducirnos a la forma de operar de esta alternativa vamos a volver al sistema sencillo de la Fig. 4 y vamos a plantear la opción alternativa de hacer que la corriente del sistema de almacenamiento de energía (I_{bat}) sea dependiente de la tensión de bus (V_{bus}), es decir:

$$I_{bat} = f(V_{bus})$$

Además, vamos a incorporar en esta función de dependencia las siguientes condiciones:

- Si $V_{bus} = V_{bus_nom}$ entonces $I_{bat}=0$. No haría falta almacenar ni devolver energía si la tensión del bus ha alcanzado el valor acordado (V_{bus_nom}).
- Si $V_{bus} > V_{bus_nom}$ entonces $I_{bat} > 0$. Necesitaremos almacenar energía.
- Si $V_{bus} < V_{bus_nom}$ entonces $I_{bat} < 0$. Necesitaremos devolver energía.
- Vamos a hacer también que la corriente de almacenamiento/devolución aumente en valor absoluto cuanto más nos alejemos del valor acordado como nominal para la tensión de bus (V_{bus_nom}). Cuanto mas separados estemos del valor nominal, mas corriente maneja el sistema de almacenamiento.

Una de las opciones más sencillas en programar una función lineal para esta dependencia, tal y como se recoge en la Fig. 9. (Podríamos decir un control “droop” lineal).

Cuanto más nos alejemos del valor nominal aumentando la tensión de bus, mayor será la potencia almacenada y al revés cuanto más nos alejemos del valor nominal disminuyendo la tensión de bus, mayor será la potencia que debe devolver el sistema de almacenamiento. Es decir, que si la tensión de bus aumenta sabemos que necesitamos almacenar energía y si la tensión del bus disminuye sabemos que necesitamos devolver energía.

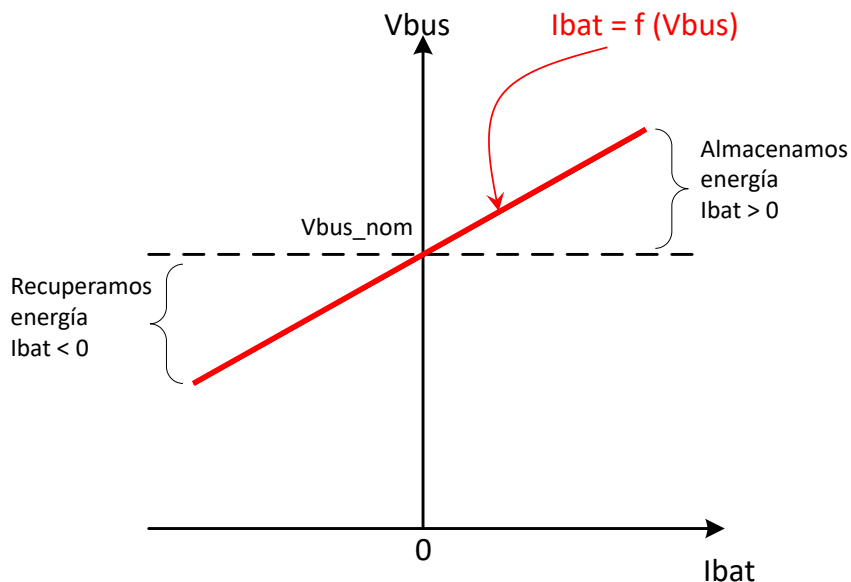


Fig. 9 Introduciendo la estrategia Droop.

En una aplicación concreta, se hace necesario fijar la potencia máxima que debe manejar el sistema de almacenamiento, y para ello podemos acordar los límites de trabajo del bus de continua (V_{bus_max} y V_{bus_min}) y también acordar en ellos la máxima potencia a manejar en cada caso. Así la Fig. 10 completa la Fig. 9 en este sentido, incorporando los límites de tensión y de potencia para la operación de sistema.

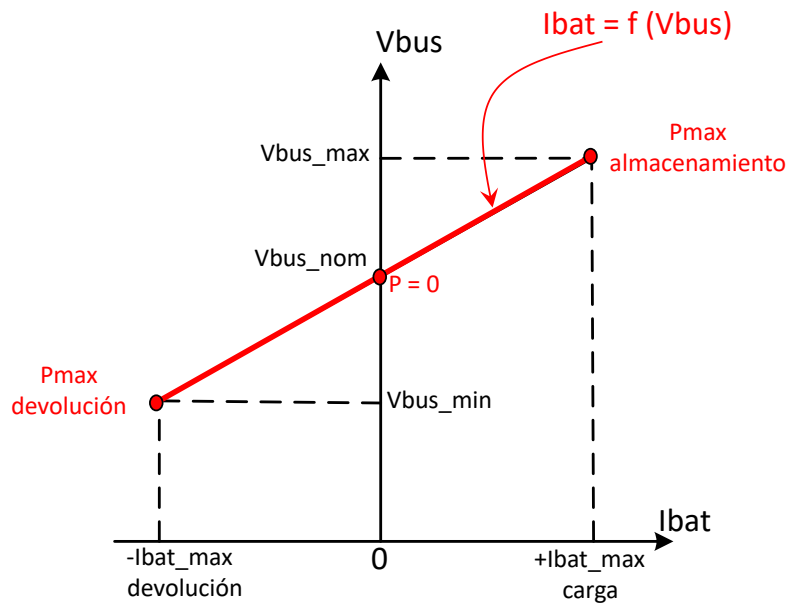


Fig. 10 Control droop con límites de potencia.

Debemos enfatizar en primer lugar, que un sistema así no regularía perfectamente el bus de continua, pero podría mantenerlo dentro de los límites de trabajo V_{bus_max} y V_{bus_min} con ciertas ventajas operacionales que trataremos de justificar en las siguientes líneas de este documento (de alguna forma, de aquí viene la terminología inglesa “droop” ampliamente extendida).

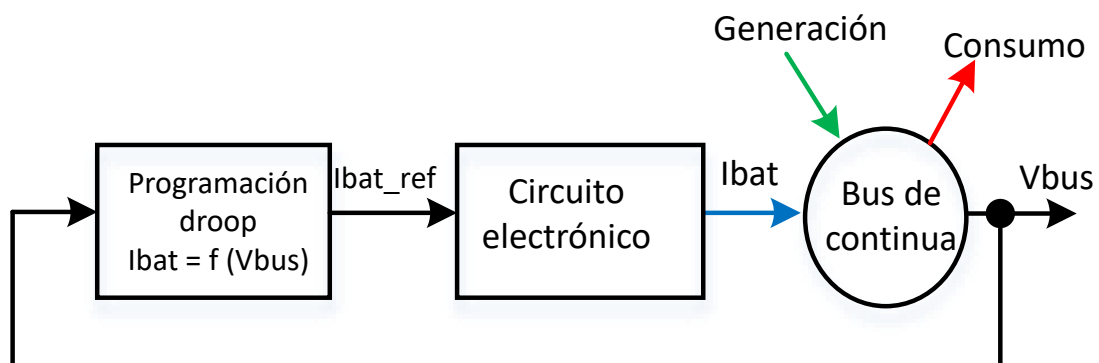


Fig. 11 Diagrama de control de la estrategia droop.

La Fig. 11 muestra el diagrama de control a implementar en una estrategia “droop”. Se observa que el circuito electrónico en el que se implementa la estrategia “droop” debe estar regulado en corriente al igual que en la estrategia maestro-esclavo, pero ahora, esta simplemente dependerá en cada momento de la tensión de bus (V_{bus}) que tengamos en cada momento.

Vamos a ver con ayuda de un pequeño ejemplo cómo funcionaría un sistema con esta estrategia de control y derivar de ello las ventajas que nos aporta.

Vamos a suponer que acordamos un bus de tensión nominal 100 V ($V_{bus_nom}=100V$) y que le permitimos una fluctuación de 20 V hacia arriba y hacia abajo. Las corrientes máximas a manejar por el sistema de almacenamiento también acordamos que serán de ± 10 A. Ello nos conduce a una personalización de la estrategia “droop” y que ha quedado recogida en la Fig. 12.

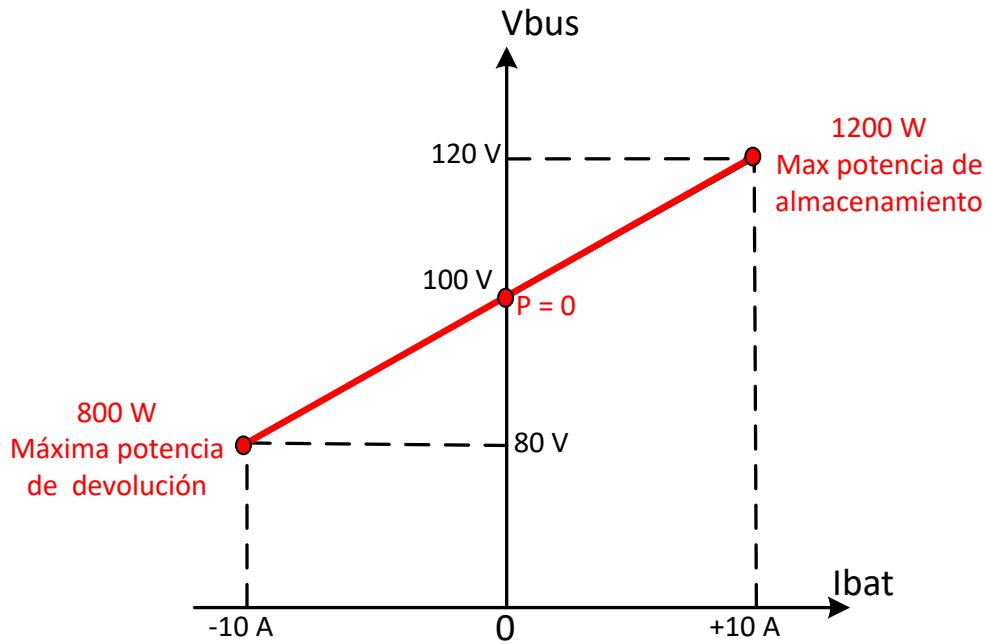


Fig. 12 Un ejemplo de estrategia “droop”.

Primer comentario:

Hay que remarcar nuevamente, que la propia programación del control “droop” ya define la tensión nominal ($V_{bus_nom} = 100\text{ V}$), y ello implica que el sistema, de forma natural, se estabilizara a su tensión nominal. Si nadie genera energía, ni nadie consume energía, el bus permanecerá estable en su valor nominal. El propio sistema de almacenamiento de energía se encargará de ello.

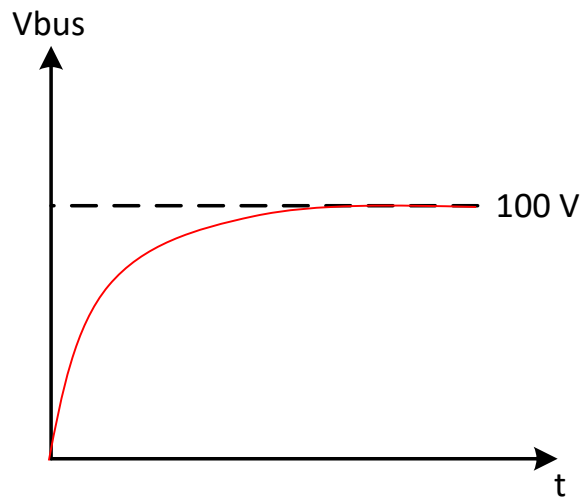


Fig. 13 SEP en equilibrio ($V_{bus_nom} = 100\text{ V}$).

NOTA: Cuando el bus de continua este por debajo del mínimo ($V_{bus} < V_{bus_min}$), algo habitual en el proceso de arranque de estos sistemas electrónicos de potencia, el propio sistema de almacenamiento normalmente limitará la corriente inyectada al bus, en este ejemplo a 10 A, hasta que la tensión del bus de continua quede dentro de sus márgenes normales de operación. (ver Fig. 14 para ver la evolución inicial sobre la curva droop hasta llegar al punto de equilibrio).

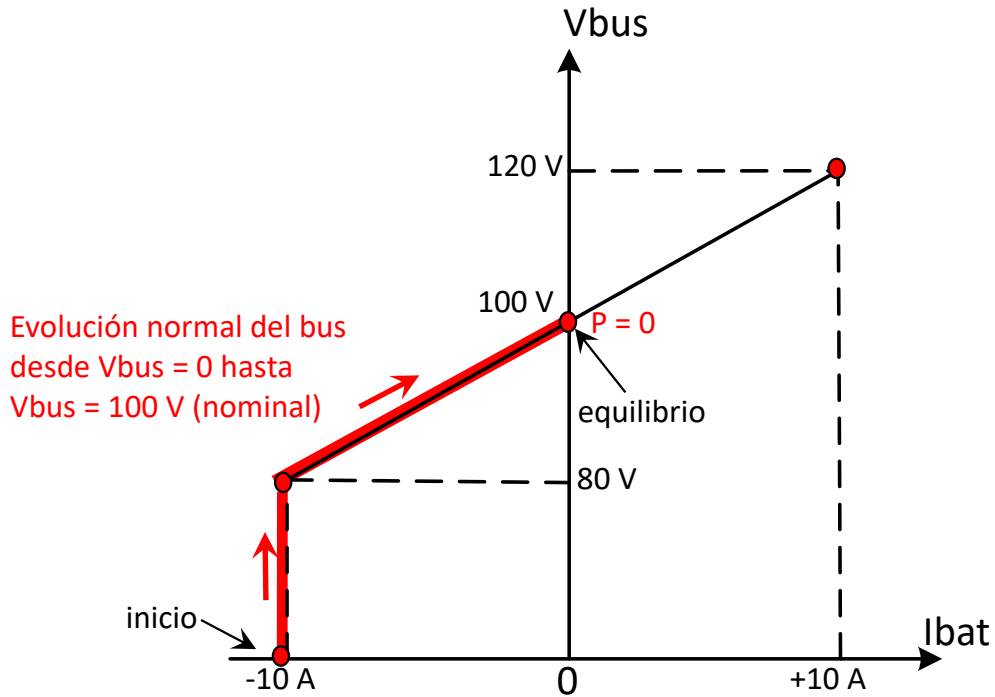


Fig. 14 Evolución inicial desde $V_{bus} = 0$ hasta $V_{bus} = 100$ V (nominal).

El sistema permanece así hasta que haya alguna generación o consumo de energía. Vamos por partes:

ESCENARIO 1: ¿Qué pasa si en un determinado momento uno de los elementos del sistema genera 800 W?

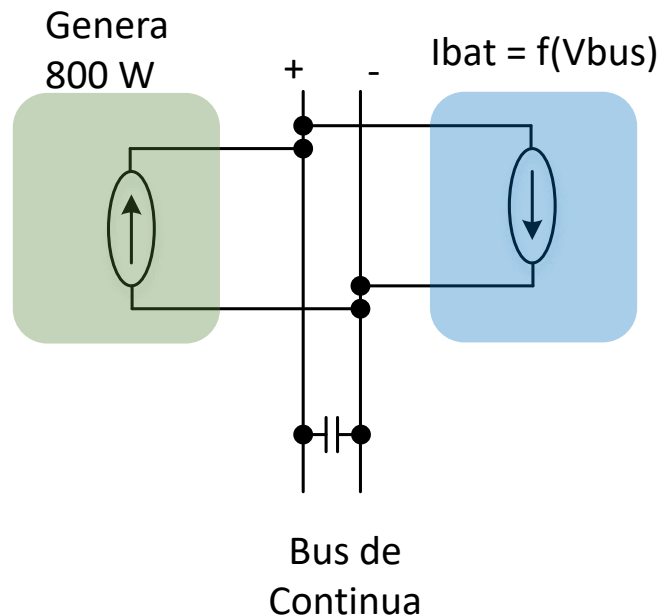


Fig. 15 Escenario 1 (generación de 800 W)

El sistema de generación inyectará energía en el bus de continua, lo que hará subir la tensión, el sistema de almacenamiento responde a esta subida de tensión en el bus almacenando energía de acuerdo a su curva “droop” programada. El sistema se equilibrará cuando el sistema de

almacenamiento almacene la misma potencia que se genera. En nuestro ejemplo, el bus se estabilizará más o menos en $V_{bus} = 113 \text{ V}$ extrayendo una corriente de aproximadamente 7 A ($I_{bat} = 7 \text{ A}$) lo que representa que en este punto se están almacenando 800 W . Se alcanza así el nuevo punto de equilibrio, donde generación y consumo se igualan. Este proceso ha quedado representado gráficamente en la Fig. 16.

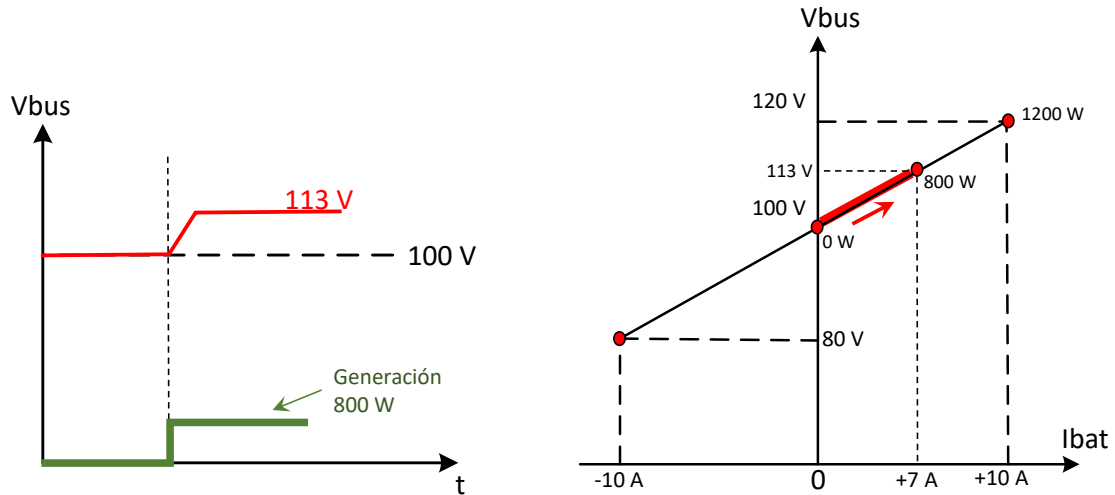


Fig. 16 Respuesta del control "droop" en el escenario 1.

Nuevamente remarcamos, que la tensión de bus no es estable, pero se mantiene dentro de unos límites definidos. Obviamente, es importante conocer la potencia máxima que se podría generar para asegurar que no nos salimos de los límites de diseño (para este caso de 1.200 W).

ESCENARIO 2: ¿Qué pasa si en un determinado momento uno de los elementos del sistema consume 800 W ?

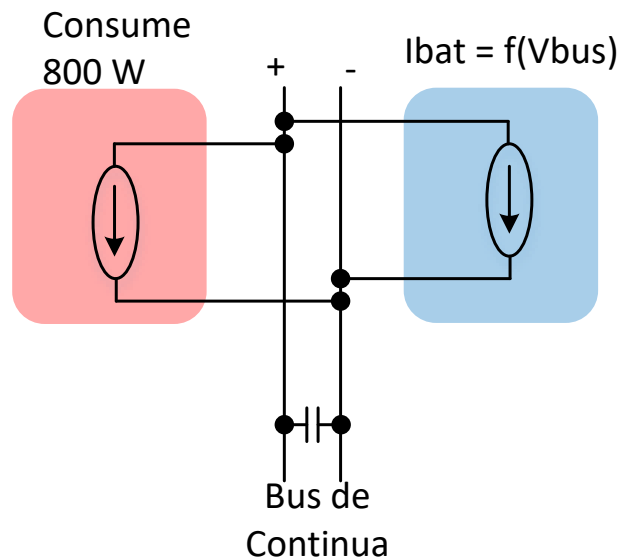


Fig. 17 Escenario 2 (consumo de 800 W).

El consumo de energía hace que la tensión de bus caiga, y a medida que esto sucede, el sistema de almacenamiento de energía devuelve energía al bus, de acuerdo a su curva "droop" programada, hasta que el sistema se equilibre.

En este escenario 2, hemos llevado la capacidad de devolver energía al límite (800 W) y por lo tanto el sistema se equilibrará en el límite inferior acordado para la tensión del bus ($V_{bus} = V_{bus_min} = 80 \text{ V}$). La Fig. 18 muestra la evolución del SEP en este escenario 2.

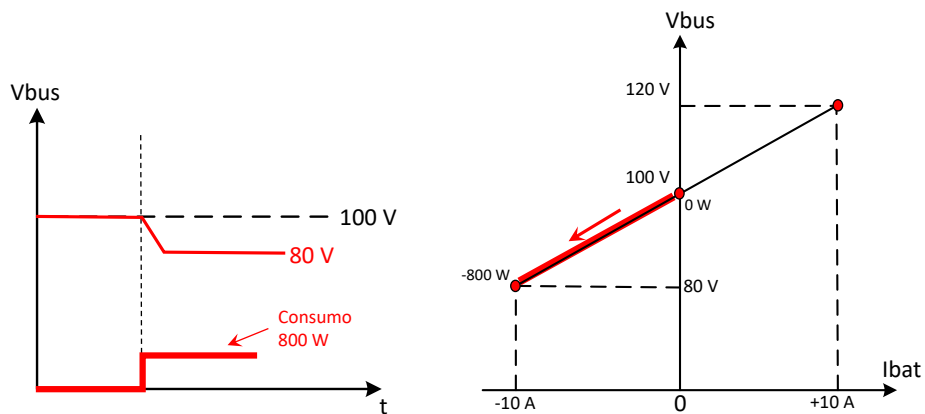


Fig. 18 Respuesta del control "droop" en el escenario 2.

Resulta evidente del análisis de ambos escenarios, que mientras la generación de energía no supere los 120W y el consumo no supere los 800 W, el bus de continua permanecerá dentro de los límites de trabajo acordados.

Notar como curiosidad, que el valor de la tensión del bus de continua (V_{bus}) es un excelente indicador para saber que está pasando con el sistema. Conociendo la programación "droop" de los sistemas de almacenamiento de energía y simplemente leyendo la tensión del bus (V_{bus}) podemos conocer la potencia instantánea que se está entregando o recuperando en cada momento:

$$P_{bus} = V_{bus} \cdot I_{bus} = V_{bus} \cdot f(V_{bus})$$

Así la Fig. 19, muestra la utilidad de la evolución de la tensión de bus, para monitorizar lo que ha pasado con el sistema durante el tiempo de uso. Esta monitorización puede ser interesante para futuras labores de operación y mantenimiento (O&M).

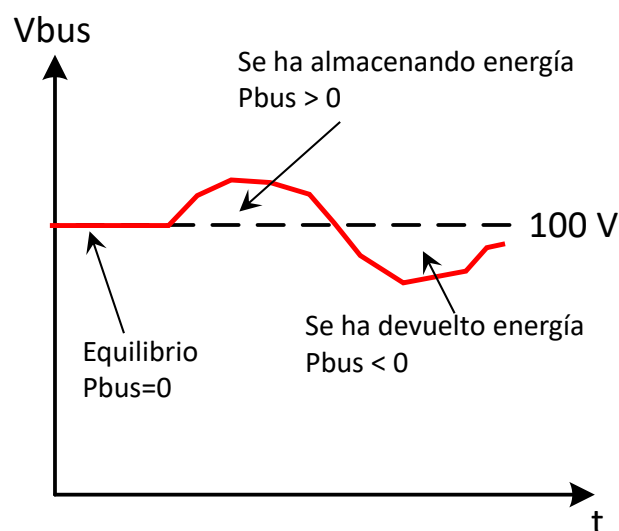


Fig. 19 La tensión de bus como monitor del sistema.

5.- La estrategia de control “droop” con varios sistemas de almacenamiento (sistemas híbridos)

La pregunta es evidente: ¿Qué pasa en una filosofía de control “droop”, si tenemos varios sistemas de almacenamiento, todos ellos con determinados perfiles “droop” programados?

Vamos a verlo extrapolando el ejemplo que tenemos. Así en la Fig. 20 tenemos un SEP con dos sistemas de almacenamiento de energía distintos (baterías, supercondensadores, volantes de inercia,...) pero que tienen programado un perfil “droop” idéntico.

Obviamente, el punto de equilibrio ($V_{bus}=V_{bus_nom}=100\text{ V}$) es idéntico sin importar en número de elementos de almacenamiento de energía que compartan el bus de continua, siempre y cuando la programación “droop” de todos ellos tenga fijado el mismo valor para V_{bus_nom} .

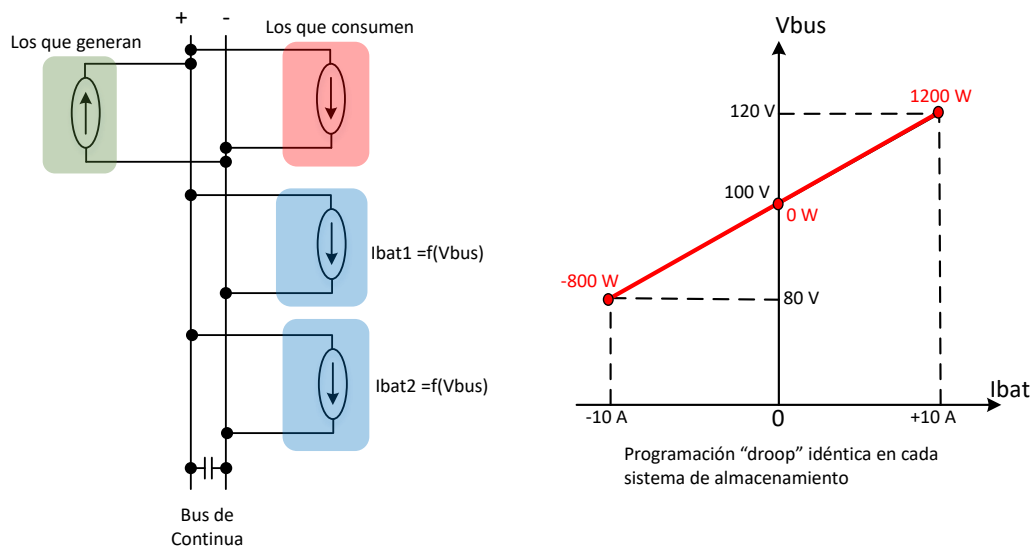


Fig. 20 SEP con dos sistemas de almacenamiento con perfil “droop” idéntico.

Analicemos ahora, en esta situación, los dos escenarios anteriores.

ESCENARIO 1: ¿En un determinado momento uno de los elementos del sistema genera 800 W ?

El razonamiento es idéntico al realizado anteriormente, la generación de energía hace subir la tensión del bus y por lo tanto cada sistema de almacenamiento va subiendo la energía almacenada hasta que se llegue al punto de equilibrio.

Obviamente, el sistema se equilibra cuando generación (800 W) y almacenamiento se igualen (400 W en cada Sistema de Almacenamiento de Energía, ya que hemos considerado que tienen idéntica programación “droop”). La tensión de bus estaría ahora sobre los 106 V .

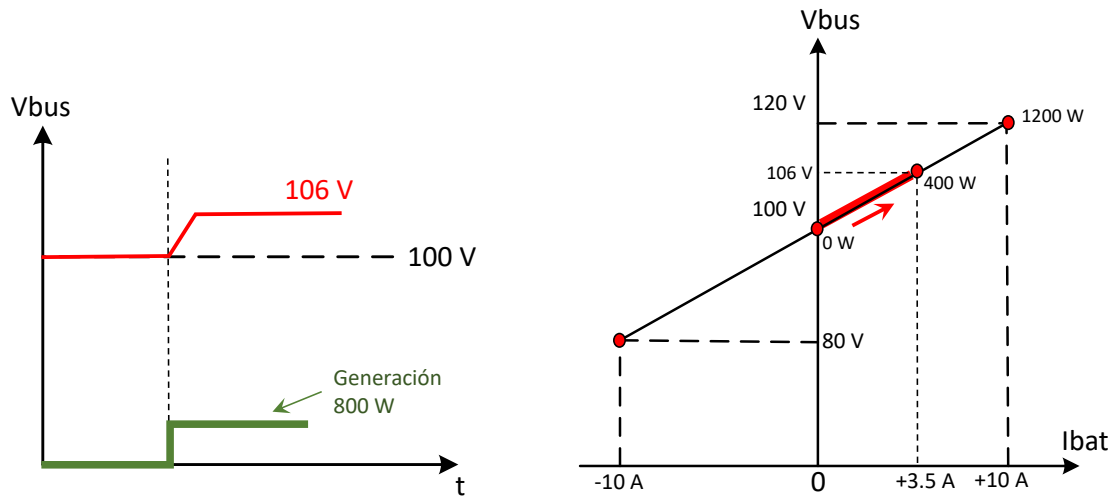


Fig. 21 Respuesta del escenario 1 en cada uno de los sistemas de almacenamiento de energía.

Al revés, ESCENARIO 2: ¿En un determinado momento uno de los elementos del sistema consume 800 W?

El equilibrio se consigue ahora, siguiendo razonamientos análogos a los anteriores, cuando cada uno de los módulos entregue 400 W. La tensión de bus se estabilizará en el entorno de los 90 V.

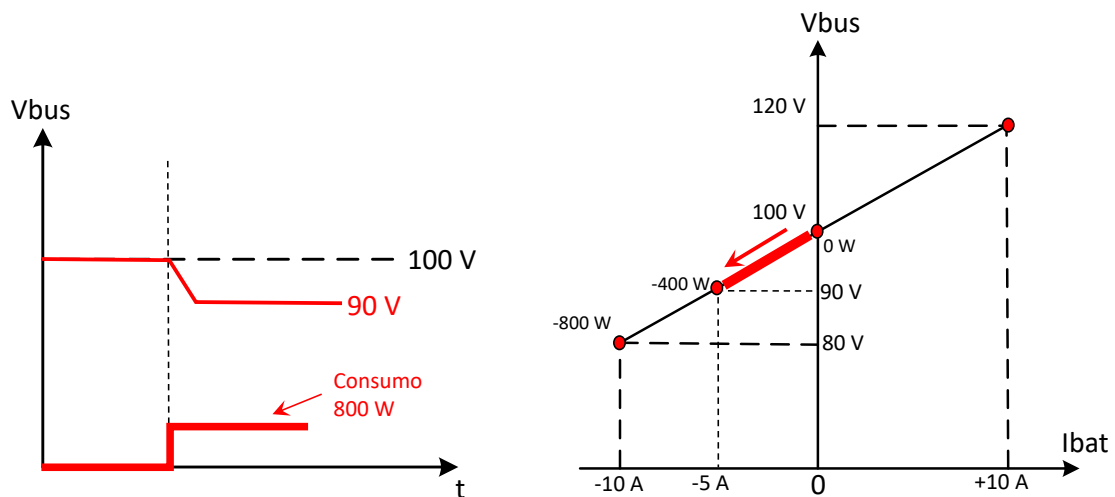


Fig. 22 Respuesta en el escenario 2 en cada uno de los sistemas de almacenamiento.

Al igual que antes, duplicamos obviamente la capacidad de entregar potencia (ahora $800\text{ W} \times 2 = 1600\text{ W}$) y manteniendo una perfecta ecualización de los módulos.

Conclusión, el control “droop” es una excelente estrategia para regular Sistemas Electrónicos de Potencia (SEP), mantenemos una perfecta ecualización de los módulos y solo renunciamos a un bus perfectamente regulado, permitiendo unas fluctuaciones programadas en el mismo.

Son elementos clave en el diseño:

- El valor de V_{bus_nom} donde $P_{bus} = 0\text{ W}$
- El valor de V_{bus_max} donde se define la máxima potencia de almacenamiento de cada módulo.

- El valor de V_{bus_min} donde se define la máxima potencia de devolución de energía en cada módulo.

Ya como cierre, tenemos importantes detalles a resaltar:

1. Podemos almacenar energía utilizando el doble de potencia de almacenamiento y recuperación.
2. Los sistemas de almacenamiento se reparten el trabajo por igual.
3. No existe comunicación entre los módulos (IMPORTANTE), todos los módulos tienen idéntica importancia (IMPORTANTE). Cada uno lee la tensión de bus y programa su corriente en función de este valor.
4. En general, podemos trabajar con sistemas de almacenamiento de energía de muy distintas tecnologías con tal de que los perfiles “droop” programados. Son módulos diferentes, pero la programación “droop” los hace iguales.
5. Podemos incluso programar perfiles “droop” distintos para que el reparto de potencia entre los módulos no sea equitativo, si así se desea por diseño.
6. La programación “droop” es relativamente sencilla de implementar en las topologías de Electrónica de Potencia con controles en modo corriente.

Un último detalle a comentar: ¿Qué pasa con el control “droop” si $V_{bus} > V_{bus_max}$?

Esto no debiera suceder. Que el bus supere su tensión máxima ($V_{bus} > V_{bus_max}$) indica que la generación de energía supera el consumo instantáneo de las cargas unido a lo que es posible almacenar en ese momento. Los sistemas de generación deben desconectarse (o reducir su potencia generada) al llegar a este punto, es una de las protecciones fundamentales en un Sistema Electrónico de Potencia.

El sistema de almacenamiento, llegado este punto, poco puede hacer. La mejor estrategia es mantener la potencia de almacenamiento constante a su valor máximo permitido, aunque la tensión de bus aumente. Debe indicarse, que esta situación podría llegar a ser destructiva y llegado el caso se podrían incorporar protecciones adicionales (por ejemplo, la conexión de cargas disipativas que permitan reducir esta situación traumática).

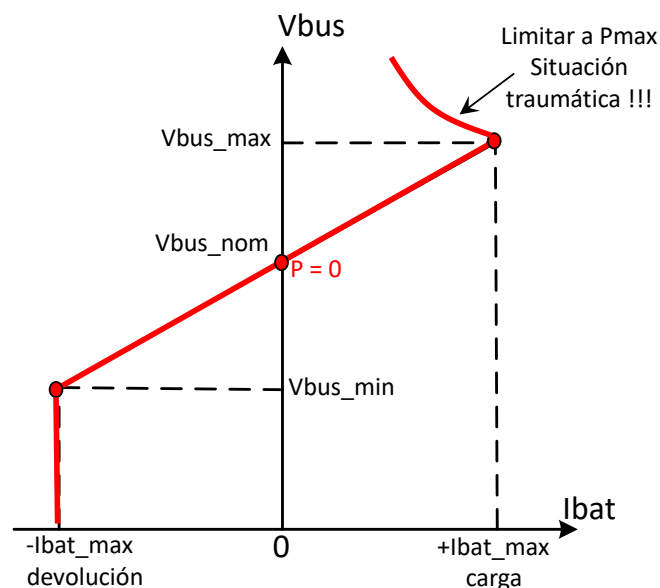


Fig. 23 Actuación ante tensión del bus por encima de V_{bus_max} (mantener potencia de almacenamiento).

6.- Implementación práctica de los perfiles “droop”.

Resulta claro que la implementación de sistemas de almacenamiento de energía precisa de la utilización de convertidores electrónicos de potencia bidireccionales. Existen muchas topologías de Electrónica de Potencia que se pueden utilizar y que permiten la implementación de la programación “droop” de formas alternativas con resultados equivalentes.

Así, para ilustrar las posibilidades en la Fig. 24 hemos incluido una típica estructura bidireccional cc-cc (convertidor cc- cc bidireccional de una rama) que permite intercambiar energía entre una batería (o supercondensador) y un determinado bus de continua.

La implementación de la estrategia de control “droop” tal y como la hemos desarrollado en este documento, implica la regulación de la corriente de entrada al convertidor (I_e) para posteriormente programar la estrategia “droop” correspondiente [$I_e = f(V_{bus})$].

Pero, existen formas alternativas de implementación que no podemos desdeñar y que pueden conducirnos a implementaciones más sencillas y cómodas de control “droop”.

Por ejemplo, podríamos regular la corriente de salida de convertidor (I_s), que es la corriente de carga/descarga de la batería, e implementar posteriormente el control droop utilizando esta corriente [$I_s = f(V_{bus})$]. Los resultados serían similares y la implementación posiblemente más sencilla.

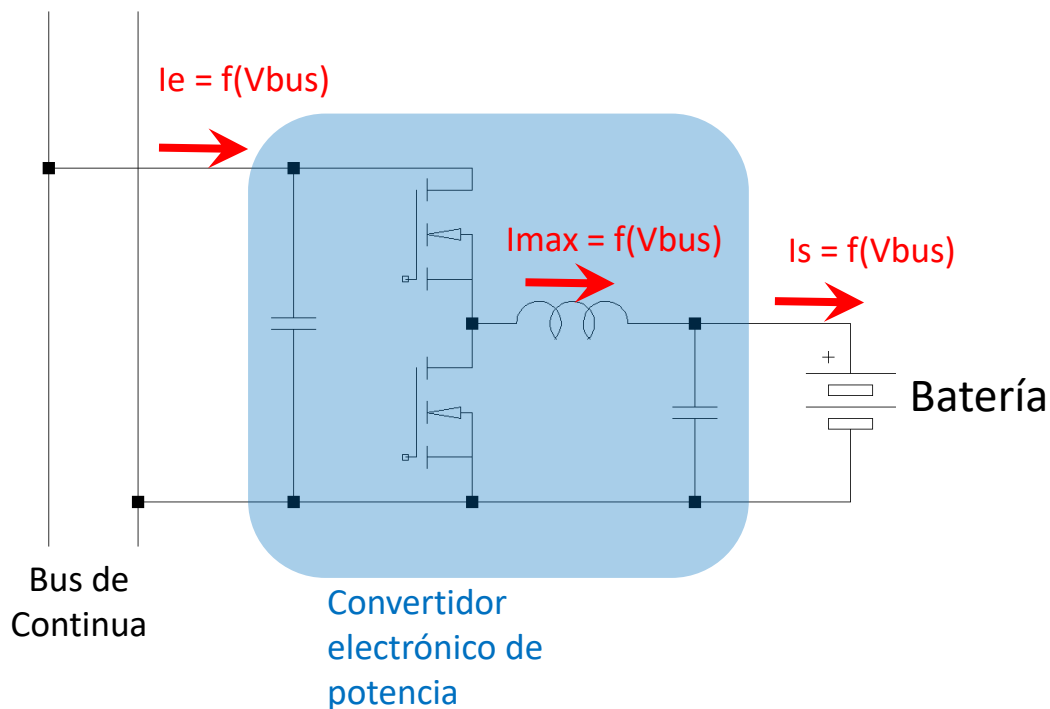


Fig. 24 Opciones de implementación del control “droop”.

Tampoco podemos olvidar que muchas veces puede resultarnos interesante utilizar modos corriente para el control de los convertidores de potencia (por ejemplo, $I_{max-Toff}$ o $I_{max-Imin}$) haciendo referencia a los valores máximos y mínimos en el inductor del convertidor.

En muchas aplicaciones, la programación “droop” puede implementarse haciendo simplemente I_{max} como una función de la tensión de bus [$I_{max} = f(V_{bus})$]. La implementación resultará muy sencilla de realizar y los resultados serán prácticamente equivalentes.

Con esto queremos decir, que dependiendo de la topología de Electrónica de Potencia que vayamos a utilizar y la estrategia de control que utilicemos (modo tensión o modo corriente) puede resultar más interesante implementar la estrategia “droop” de una forma o de otra.

No hay un criterio universal, la regla debe de ser la sencillez y la facilidad de implementación. Cada caso debe analizarse y tomarse la decisión de implementación que más nos convenga.

Hasta ahora hemos trabajado con perfiles “droop” del tipo “corriente que depende de la tensión de bus”, pero debemos decir que los perfiles “droop” del tipo “Potencia que depende de la tensión de bus” también son posibles.

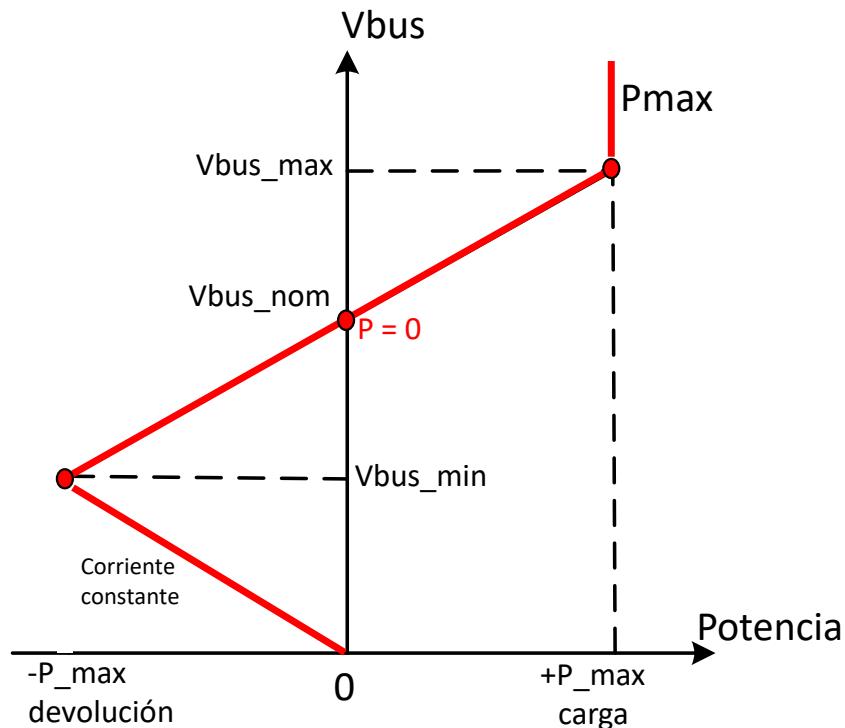


Fig. 25 Control “droop” en términos de potencia.

Los perfiles basados en potencia extraída del bus como función de la tensión de bus, son muy sencillos de implementar en determinadas topologías de potencia.

Por ejemplo, en el convertidor DAB y en los inversores de enlace a red (GTI) la implementación de la estrategia “droop” basada en potencia es más sencilla que la basada en corriente.

Ello es debido a que puede implementarse muy fácilmente a través del control de los ángulos de desfase entre inversores (DAB) o desfase entre inversor y red eléctrica (GTI).

COMENTARIO: La Fig. 26 muestra a nivel de bloques el uso del convertidor CC-CC tipo DAB para interconectar una batería a un bus de continua y el inversor del enlace a red (GTI) para interconectar la red eléctrica convencional (230 V_{eff} – 50 Hz) con el bus de continua. En este sentido es conveniente indicar y enfatizar que en muchas aplicaciones la red eléctrica convencional juega el papel de “sistema de almacenamiento de energía” respecto al bus de continua. Aunque esto pueda sonar extraño, se dice en el sentido, de que si sobra energía en el bus de continua se entrega a la red eléctrica y si hace falta energía la obtenemos de la red eléctrica. Podríamos considerar la red eléctrica como una especie de “batería infinita”. Por ello la implementación de estrategias “droop” en el inversor de enlace a red es totalmente aplicable.

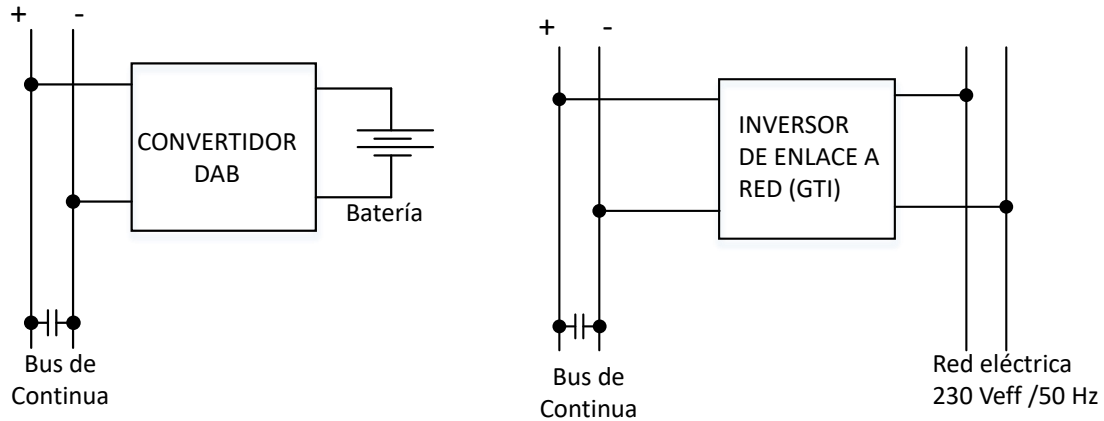


Fig. 26 Usos del convertidor DAB y del inversor de enlace a red (GTI)

En su momento cuando se analicen los convertidores CC-CC bidireccionales “DAB” y los inversores de enlace a red (GTI), introduciremos lo que denominaremos “Phase Droop Control” que no es más que una implementación alternativa de la estrategia de control “droop” en términos de potencia.

PERFILES “DROOP” CON ZONA MUERTA

Vamos a concluir este documento mencionando brevemente los perfiles “droop” con zona muerta, como una alternativa muy interesante de implementación para el caso de supercondensadores o volantes de inercia, en aplicaciones muy concretas.

Hay situaciones en las cuales el sistema de almacenamiento o recuperación de energía solo debe actuar en determinados momentos, por ejemplo, para absorber picos de generación o consumo de energía. Esto es típico en vehículos eléctricos, donde dispositivos de actuación rápida basados en supercondensadores o volantes de inercia (KERS – Kinetic Energy Recovery System) permiten absorber estas situaciones extremas durante frenados o aceleraciones bruscas.

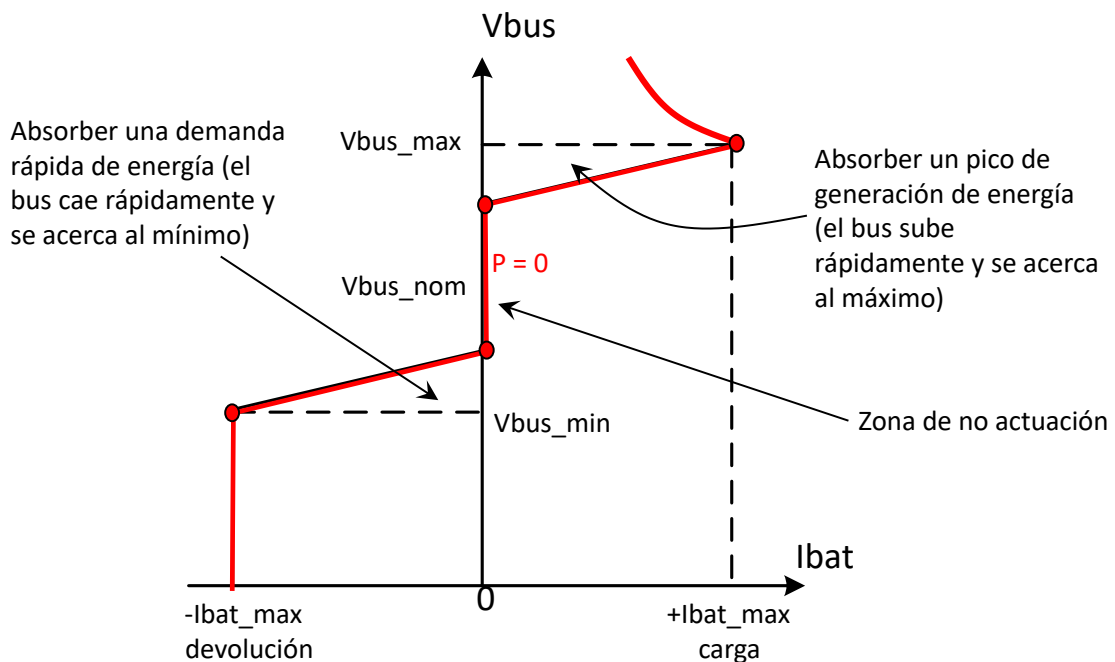


Fig. 27 Perfiles “droop” con zona muerta (supercondensadores o KERS).

Así, en la Fig. 27 tenemos un posible perfil “droop” de actuación para estos casos. Existe una zona muerta importante alrededor de la tensión nominal de bus de continua y una capacidad de actuación rápida para absorber picos de generación de energía (frenado brusco) o picos de demanda de energía (aceleración brusca), cuando la tensión del bus de continua está próximo a sus extremos.

7.- Material adicional para consultar.

Recomendamos consultar los videos PEP disponibles en YouTube (<http://mrico.dieecs.com/teaching>) para ampliar detalles sobre esta temática y en concreto son de interés las siguientes:

- PEP-08: Básico del Control Modo Corriente de Convertidores CC-CC.
- PEP-10: Convertidor DAB (Parte 1).
- PEP-11: Convertidor DAB (parte 2).
- PEP-12: Convertidor DAB (Parte 3): Un ejercicio de diseño.
- PEP-21: Estabilización de una microrred de continua con control Droop en modo corriente.
- PEP-31: Interconexión de buses/baterías con tensiones simulares: El convertidor de Cuadrante.
- PEP-04: El inversor de enlace a red como estabilizador de una microrred de continua. Parte 1.
- PEP-05: El inversor de enlace a red como estabilizador de una microrred de continua. Parte 2.