

Estado del arte en Correctores de Factor de Potencia Trifásicos

2.1 Introducción

Debido a las desventajas descritas en el capítulo anterior, las cuales ocasionan daños, la comunidad científica de la Electrónica de Potencia se ha prestado a la investigación respectiva desde ya hace unos 30 años y está presentando trabajos dirigidos a la utilización de convertidores CA-CD con alto factor de potencia y bajo contenido armónico en la corriente de entrada [09-16].

En la actualidad, existen numerosas aplicaciones donde se requieren fuentes de alimentación de CD. Como es sabido, la fuente universal de alimentación esta dada en CA, esto impone una conversión de CA a CD. Por tradición se utilizan rectificadores a diodos sin embargo esta solución provoca corrientes no senoidales en las líneas de CA, reduciendo la eficiencia en la transferencia de energía. Nuevas soluciones han surgido para aumentar la eficiencia; a esta nueva tecnología se le conoce como **Corrector de Factor de Potencia** (circuito capaz de proporcionar un voltaje de CD constante o

variable sin distorsionar ni el voltaje ni la corriente en las líneas de alimentación de CA).

La mayoría de los equipos electrónicos, presentan en su etapa de entrada un esquema de conversión CA/CD conformado por un puente rectificador y un filtro tipo capacitivo. La principal ventaja de este esquema es su simplicidad y bajo costo-volumen, sin embargo, este esquema presenta un bajo factor de potencia que fluctúa entre 0.5 y 0.7 y un alto contenido armónico debido a que los diodos del puente rectificador sólo conducen durante el tiempo en que el capacitor repone su carga [07].

2.2 Convertidores CD-CD Básicos para CFP

Los convertidores de CD-CD son circuitos electrónicos de potencia que transforman un voltaje de corriente continua en otro nivel de tensión de corriente continua. Un método para convertir un voltaje de CD en otro valor mas bajo consiste en utilizar un regulador lineal. Este circuito consta de un transistor el cual opera en la región lineal en vez de operar en la región de saturación y corte, de tal forma que el transistor se comporta como una resistencia variable; esta forma de reducir la tensión y regular el voltaje de salida, aunque simple, presenta una baja eficiencia ya que la pérdida

de potencia en el transistor es alta por lo cual este circuito es ineficiente.

Otra alternativa más eficiente a los reguladores lineales son los convertidores conmutados, también llamados troceadores de CD. En estos dispositivos el transistor funciona como interruptor electrónico ya que trabaja en la región de saturación o corte, es decir, o está activado o desactivado [26]. Para estos circuitos la potencia ideal absorbida por el circuito será de cero, cuando el interruptor se abre no pasa corriente por él; cuando el interruptor está cerrado no presenta caída de tensión. Por lo tanto la carga absorbe toda la potencia y la eficiencia sería del 100%. En la realidad, el voltaje en el interruptor no será cero cuando conduzca, además éste tendrá que pasar por la región lineal al pasar de un estado a otro [21].

Existen seis convertidores básicos CD-CD: Elevador (Boost), Reductor (Buck), Reductor -Elevador (Buck-Boost), Cuk, Sepic y Zeta; los cuales a continuación se presentan sus circuitos correspondientes y una breve descripción de los mismos. Todos estos convertidores tienen sus limitaciones intrínsecas en la utilización para la corrección del factor de potencia [08].

2.2.1 Convertidor Elevador

El convertidor mostrado en la fig. 2.1 es ampliamente utilizado en la industria, no es naturalmente aislado, y opera solamente como elevador de voltaje, no es capaz de protegerse así mismo contra sobre corriente de carga o cortocircuito y en cada fase lleva un inductor elevador. Como la corriente de entrada no es interrumpida (en modo de conducción continua), la exigencia de filtro para la IEM (interferencia electromagnética) es mínima. La energía es almacenada más eficientemente en el capacitor de salida C_o , el cual opera en alta tensión ($V_o > E$), esto le permite valores relativamente menores de capacitancia. La presencia del inductor en la entrada bloquea variaciones bruscas en la tensión de red (spikes), facilitando la obtención de la forma deseada de corriente (senoidal) [02].

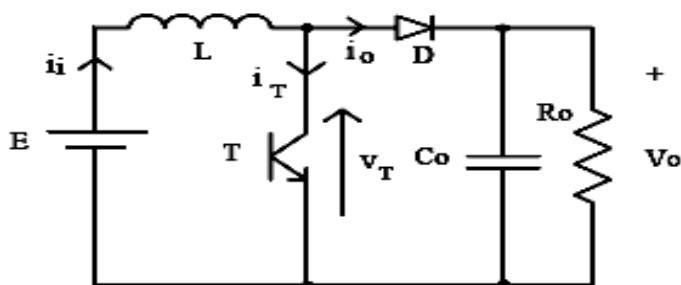


Fig. 2.1 Convertidor Elevador

La aplicación del convertidor elevador es significativa en fuentes reguladas y en el frenado regenerativo de motores, es

una estructura muy sencilla de la cual se derivan otras más complejas como el reductor-elevador o el Cuk.

La eficiencia del convertidor elevador es alta debido a que tiene pocos elementos disipativos. Una de las desventajas del convertidor es que es muy sensible a los cambios en el ciclo de trabajo del transistor, que hace las veces de interruptor por lo que pudiera resultar difícil estabilizarlo.

2.2.2 Convertidor Reductor

El convertidor reductor mostrado en la fig. 2.2 tiene la capacidad natural de limitar la corriente de arranque y protegerse contra sobrecarga por la ubicación del interruptor. Sin embargo, para su utilización en corrector de factor de potencia, el voltaje de salida CD deberá ser mucho más bajo que el voltaje pico de entrada CA, consecuentemente los semiconductores de potencia están sujetos a alto estrés, debido a esto, este convertidor no tiene futuro en aplicaciones de corrección de factor de potencia [08].

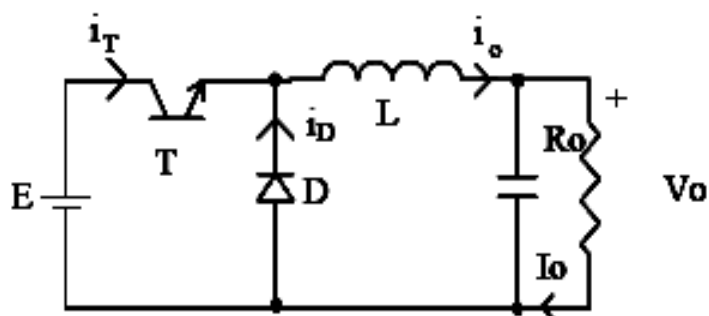


Fig. 2.2 Convertidor Reductor

2.2.3 Convertidor Reductor-Elevador

El convertidor reductor-elevador que se muestra en la fig. 2.3 permite tener una tensión de salida menor o mayor a la tensión de entrada. Como corrector de factor de potencia sus principales ventajas son [25]:

- Facilidad de introducir aislamiento entre la entrada y la salida.
- En conducción discontinua, operando con frecuencia fija, el circuito emula una carga resistiva y de esta forma no es necesario un control multiplicador.
- El interruptor por su ubicación puede proteger sobrecorrientes y cortocircuitos en la carga.
- Es capaz de limitar la corriente de arranque (inrush).

Como desventajas se pueden citar:

- Inversión en la polaridad de la tensión de salida en el circuito no aislado, lo cual trae algunas dificultades al control.
- Elevado estrés del interruptor (suma de las tensiones de entrada y salida).
- Elevadas corrientes RMS y de IEM (interferencia electromagnética) conducida, debido a la operación en modo discontinuo.

tensión en el capacitor C2 es igual a la tensión de salida V_o . La tensión sobre el capacitor C1 es la de la entrada E, el transistor debe soportar una tensión igual a la suma de la tensión de entrada y la tensión de salida reflejada en el primario del transformador. Este convertidor es una combinación en cascada de un convertidor reductor y un elevador. Del lado de la fuente de entrada es un convertidor elevador y del lado de la carga es un convertidor reductor. El capacitor C1 se usa como reserva capacitiva para el convertidor. El elemento magnético se comporta efectivamente como un transformador, una vez que la corriente media en ambas bobinas es nula, lo que está garantizado por la presencia de los dos capacitores en serie, de modo que no es necesario entrehierro en el transformador. En el Sepic, circula corriente por el "secundario" apenas cuando el diodo D conduce, y su valor medio por tanto, no es nulo; el transformador puede ser dimensionado de modo que la propia inductancia de magnetización sea la inductancia L2, reduciendo el número de componentes [25].

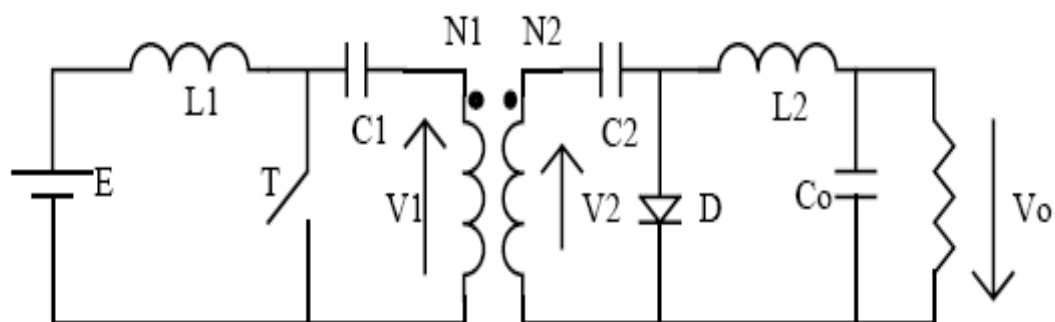


Fig. 2.4 Convertidor Cuk aislado

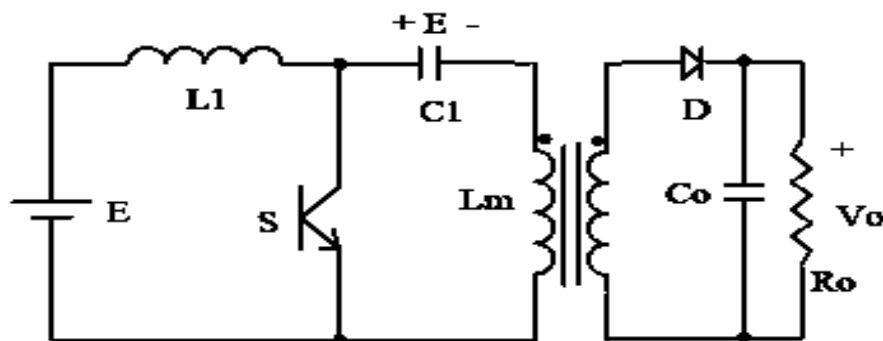


Fig. 2.5 Convertidor Sepic aislado

2.2.5 Convertidor Zeta

El convertidor tipo Zeta no aislado con entrada de CD mostrado en la fig. 2.6 posee la característica reductora-elevadora de tensión, aquí la corriente de entrada es siempre discontinua (como sucede en el convertidor reductor-elevador), y la salida es continua; la transferencia de energía se hace vía capacitor.

La operación en modo discontinuo se caracteriza por la inversión de sentido de la corriente por una de las inductancias $L1$ o $L2$. La posición del interruptor permite una protección natural contra sobrecorriente. La tensión del transistor V_T y del diodo V_D es igual a $V_0 + E$.

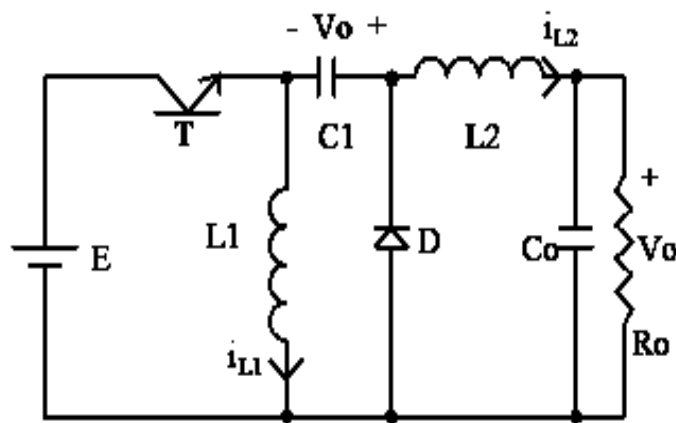


Fig. 2.6 Convertidor Zeta no aislado

El convertidor Zeta aislado puede utilizarse como CFP, fig. 2.7. Aquí notamos que su etapa de entrada es idéntico al del convertidor fly-back, sin embargo, su comportamiento en discontinuidad es como en los convertidores Cuk y Sepic, o sea, la corriente se invierte de sentido en una de las inductancias (inductancia de magnetización del transformador $L1$ o en la inductancia de salida $L2$). Al operar en modo discontinuo, la corriente del transistor, que es la propia corriente de entrada, parte siempre de cero y crece a un valor de pico proporcional al valor instantáneo de la tensión de entrada y al

ancho del pulso. La corriente media de entrada también obedece a una ley senoidal, de donde se considera que el convertidor emula una carga resistiva, llevando idealmente a un factor de potencia unitario (considerando la corriente media de entrada, ya filtrada las componentes de alta frecuencia producidas por la conmutación. En modo continuo, debe operar con un control adecuado para ajustar el ancho de pulso al valor de la tensión de entrada, como sucede en el convertidor elevador de tensión.

Sus principales características son: aislamiento natural, protección natural contra sobrecorriente y sobrecarga, único estado de procesamiento de energía, salida con características de fuente de corriente, naturalmente adaptado para utilización con múltiples salidas [25].

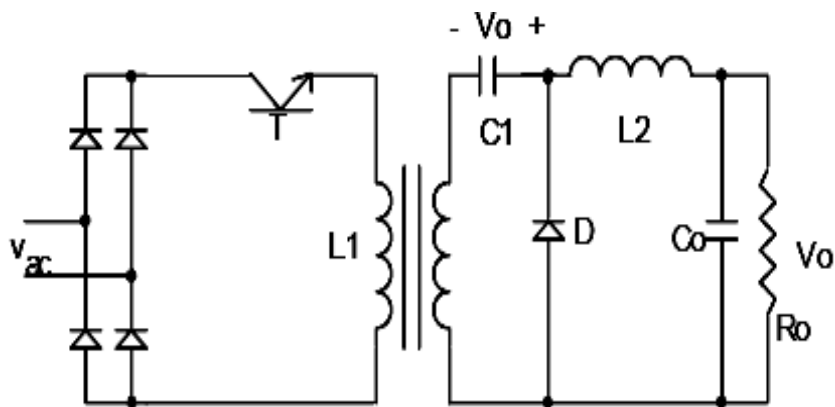


Fig. 2.7 Convertidor Zeta Aislado

2.3 Convertidores CA-CD Trifásicos con corrección de Factor De Potencia

Como ya se ha dicho la distribución de energía eléctrica se hace generalmente mediante líneas trifásicas. Así a los usuarios industriales se les suministra tensión trifásica directamente, mientras que a los usuario particulares se les suministra fase y neutro o dos fases y neutro por tanto un sistema monofásico a dos o tres hilos.

La ventaja principal del sistema trifásico es que para una misma potencia la corriente se distribuye mediante 3 fases con lo que es menor por fase. Además la potencia activa suministrada por un sistema trifásico equilibrado es constante mientras que para el sistema monofásico es pulsante y en promedio mucho menor. El rizado después de una rectificación trifásica (también llamado de seis pulsos) es mucho menor que para el caso monofásico.

Al ser la potencia constante en sistemas trifásicos, son los preferidos para alimentar grandes máquinas ya que cuando la potencia es pulsante como es el caso monofásico, se producen muchas vibraciones indeseables. Además, la potencia constante permite tener un filtro de salida menor y una respuesta dinámica más rápida. El diseño de entrada también se simplifica.

En términos de corrección activa en alta frecuencia del factor de potencia para fuentes con alimentación trifásica equilibrada, la literatura disponible nos muestra diversas topologías y técnicas existentes que se mencionarán algunas a continuación para ubicarnos en el contexto de esta tesis.

Es sabido, que con la corrección de factor de potencia a alta frecuencia, se logra mejorar la densidad de potencia del sistema y la velocidad de respuesta, así como obtener factores de potencia muy cercanos a la unidad y contenidos armónicos muy bajos, además, permite regular la tensión o potencia de salida.

En sistemas trifásicos los convertidores CD-CD tipo elevador son los más utilizados y gracias a los controladores por microprocesador o DSP (Procesador digital de señales) se pueden desarrollar controles complejos con factores de potencia cercanos a la unidad y frecuencias de conmutación muy altas.

A continuación se presentan brevemente algunas características de trabajos y tendencias sobre la corrección de factor de potencia trifásico, con la finalidad de lograr la comprensión del análisis a seguir en la topología propuesta en este trabajo de tesis.

En [10], fig. 2.8, se describe un convertidor trifásico CA-CD con un solo interruptor con alto factor de potencia y

amplio rango de regulación, operación en conducción discontinua, presenta elevado esfuerzo el interruptor, aislamiento para alta frecuencia, conversión elevadora o reductora, armónicas de corriente reducidas en la entrada, aplicación en telecomunicación.

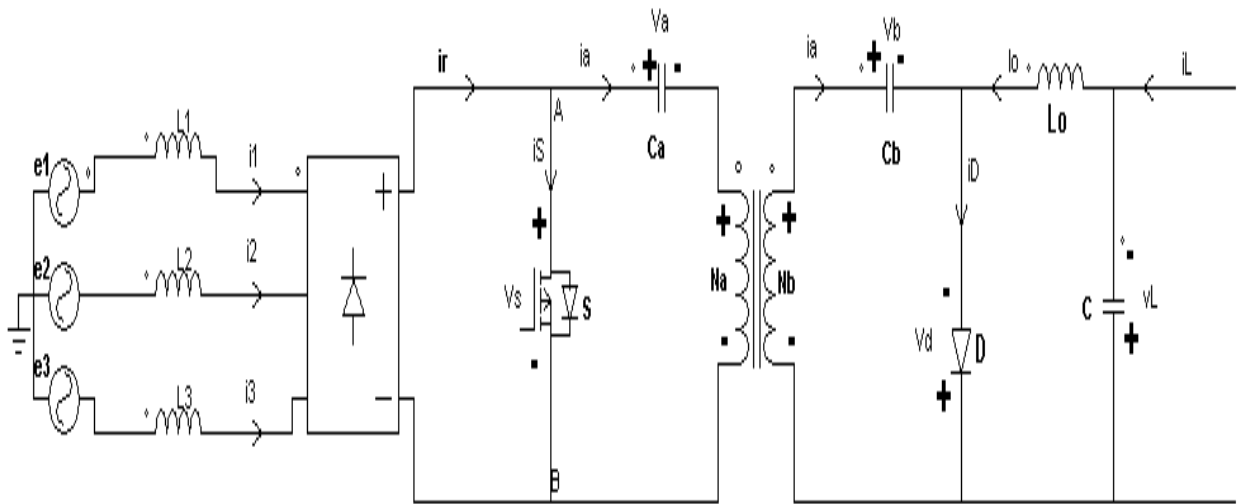


Fig. 2.8 Convertidor Trifásico CA-CD aislado, un solo interruptor, operación discontinua

El convertidor propuesto en [11], fig. 2.9, consiste de un filtro LC a la entrada, buen desempeño, su estructura está compuesta de tres interruptores sincronizados (S1, S2, S3), tres inductores L reductor-elevador conectados en estrella, y un interruptor complementario S4 para control de la tensión de salida, además opera en conducción discontinua con elevado valor eficaz de corriente.

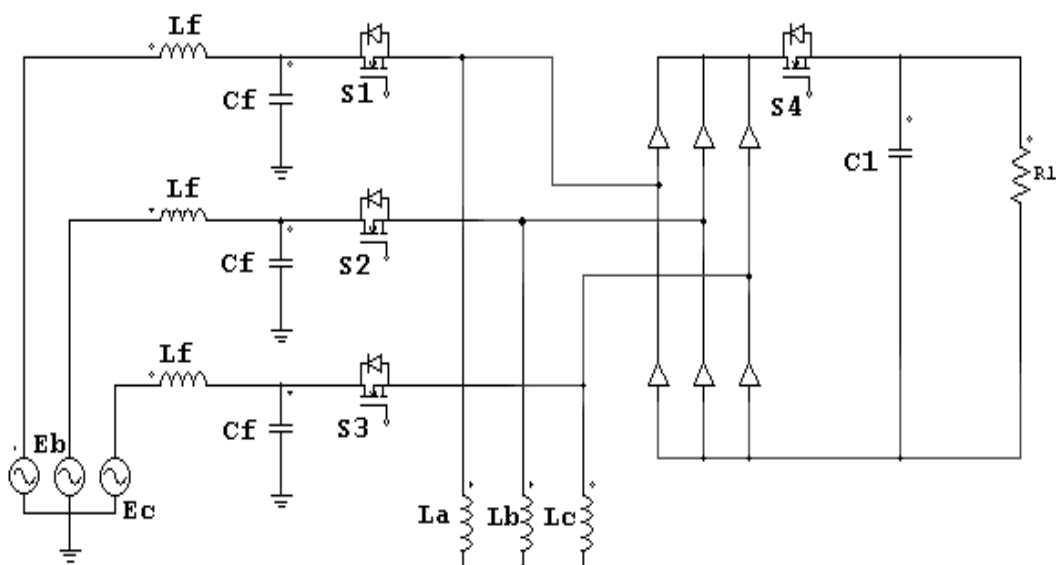


Fig. 2.9 Convertidor Trifásico CA-CD elevador-reductor con alto factor de potencia y corriente senoidal a la entrada

En la referencia [18], fig. 2.10, se describe una topología de rectificador de seis pulsos constituido por un puente completo de interruptores, este convertidor permite el flujo bidireccional de potencia, aunque los interruptores son sometidos a esfuerzos significativos, han de necesitar elevada frecuencia de conmutación para la reducción de las dimensiones del filtro de entrada. Por tanto, la estructura en cuestión posee costo elevado y su eficiencia es reducida.

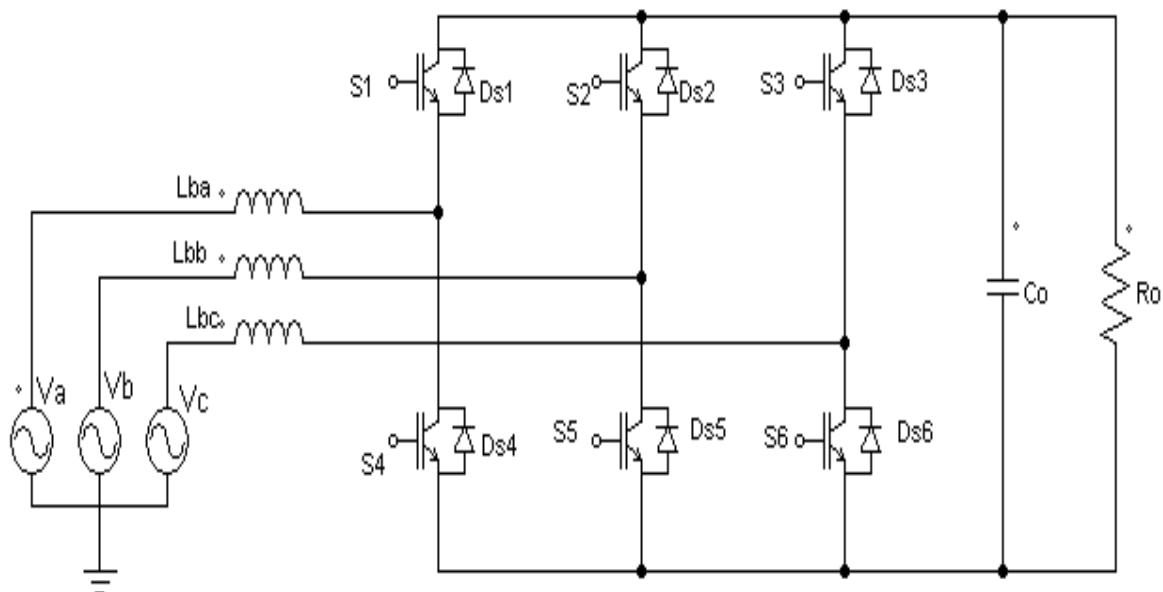


Fig. 2.10 Rectificador Trifásico tipo puente completo con seis interruptores

Una técnica activa de corrección de factor de potencia para rectificadores trifásicos que utilizan un interruptor se presenta en [09], fig. 2.11, este rectificador basa su estructura en un clásico puente de seis diodos al que se le añade un convertidor CD-CD elevador para corrección del factor de potencia. Este convertidor también se puede utilizar para regular la tensión de salida, funciona en modo discontinuo, es decir que la bobina se desmagnetiza completamente en cada ciclo.

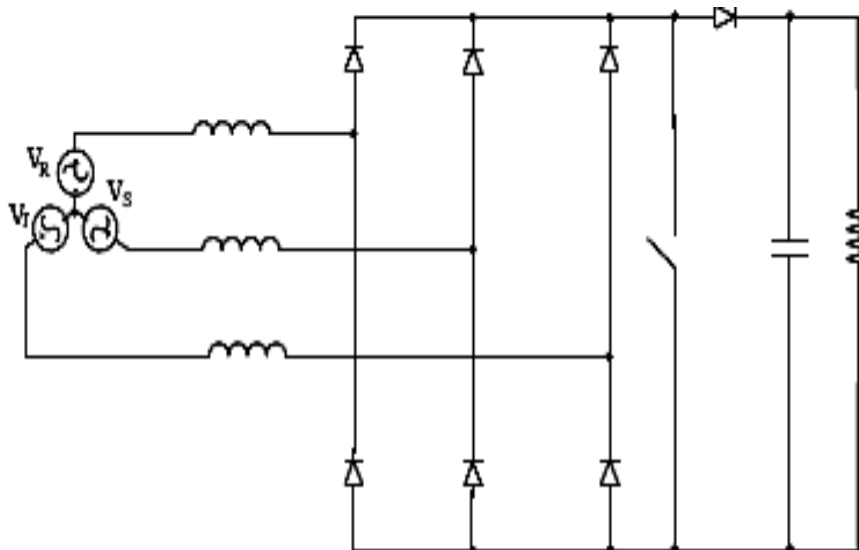


Fig. 2.11 CFP Trifásico con Convertidor Elevador con un interruptor e inductores en el lado fuente

La frecuencia de trabajo es constante y el ciclo de trabajo es utilizado para controlar la tensión de salida. Las bobinas de entrada del convertidor se colocan a la entrada del rectificador y se distribuyen entre cada fase, con lo que se tiene tres bobinas de entrada.

Al trabajar en modo discontinuo la corriente siempre se anula con lo que el valor medio de esta corriente también es proporcional a la tensión ya que sigue a la tensión de entrada que es sinusoidal. Se deduce que la corriente de entrada en promedio estará siempre en fase con la tensión de entrada. El factor de desplazamiento es la unidad y el único contenido armónico existente es de alta frecuencia que es debido a la frecuencia de conmutación. La desventaja radica en que aumenta

el estrés en el interruptor activo. Además, el trabajar en modo discontinuo implica la necesidad de un filtro de entrada y sobre todo de salida para evitar problemas de interferencia electromagnética (EMI). Con este rectificador se obtiene un factor de potencia cercano a la unidad y sólo es empeorado por el contenido armónico de alta frecuencia de la corriente de entrada, el cual se degrada ligeramente conforme aumenta el ciclo de trabajo.

Se ha de recordar que en el caso del rectificador elevador se obtiene un factor de potencia cercano a la unidad ya que la corriente por las bobinas de entrada es discontinua y sigue a la tensión de entrada. El promedio de la corriente está entonces en fase con la tensión de entrada. Para aplicar este principio al rectificador reductor mostrado en [20], fig.2.12, se ha de buscar el caso dual, es decir, se ha de intentar alimentar el rectificador con fuente de corriente de entrada y utilizar un condensador de entrada pequeño de forma que tengamos una tensión discontinua que siga a la corriente de entrada; entonces ambas estarán en fase y la tensión de entrada sólo tendrá armónicos de alta frecuencia.

Tanto el inductor como el capacitor necesarios son los del filtro de entrada del rectificador, sólo hay que dimensionarlos adecuadamente. El ciclo de trabajo sólo es útil para regular la tensión de salida, y el factor de potencia es cercano a la unidad de forma natural.

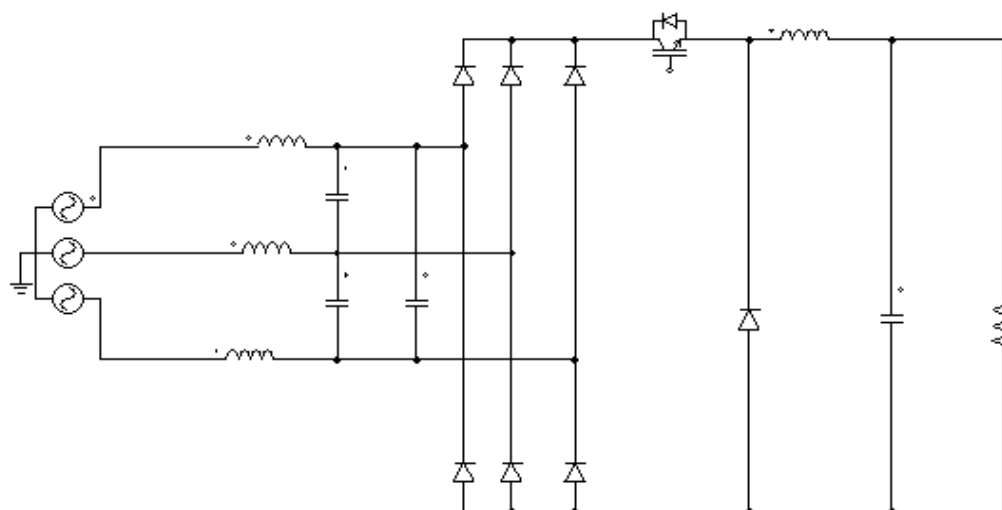


Fig. 2.12 CFP Trifásico con Convertidor Reductor con un solo interruptor y filtro a la entrada

La ventaja principal de este tipo de CFP es su simplicidad, tanto de control como de diseño, así como su bajo costo, ya que utiliza un solo interruptor activo. Su gran desventaja, es el estrés mayor que sufre este único interruptor.

En [03], fig. 2.13, se presenta un rectificador trifásico aislado con transformador, con corrección de factor

de potencia empleando un convertidor CD-CD Sepic. La estructura propuesta opera con frecuencia constante, con una etapa de procesamiento de energía, utiliza un interruptor para el control de flujo de potencia, no necesita de filtros de línea entre la red y el rectificador. El prototipo implementado utiliza un integrador para controlar la ganancia estática de tensión; proporciona corrección de factor de potencia operando en modo de conducción continua, lo que lo hace atractivo para aplicación en alta potencia. Esta estructura es particularmente empleada en aplicaciones donde la carga presenta un comportamiento de fuente de tensión. El número reducido de componentes aumenta su confiabilidad. Puede operar como elevador o reductor de tensión, proporcionando una mejor flexibilidad de aplicaciones.

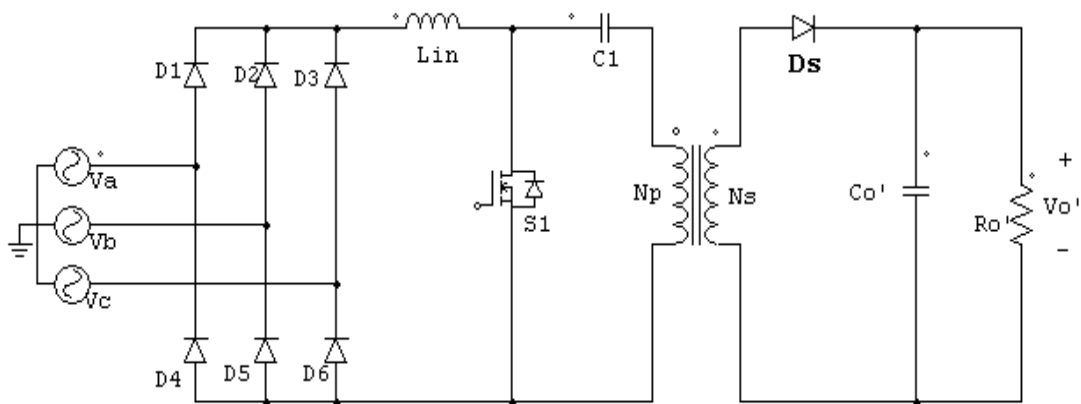


Fig. 2.13 CFP Trifásico con Convertidor SEPIC (A Single-Ended Primary Inductance Converter) aislado con un interruptor

En [25], fig. 2.14, se muestra la topología de un convertidor Cuk con entrada trifásica y rectificadora a diodos. Las inductancias de entrada están colocadas antes del rectificador. La tensión sobre C1 es aproximadamente igual a la tensión rectificada, mientras que en C2 la tensión es igual a la tensión de salida.

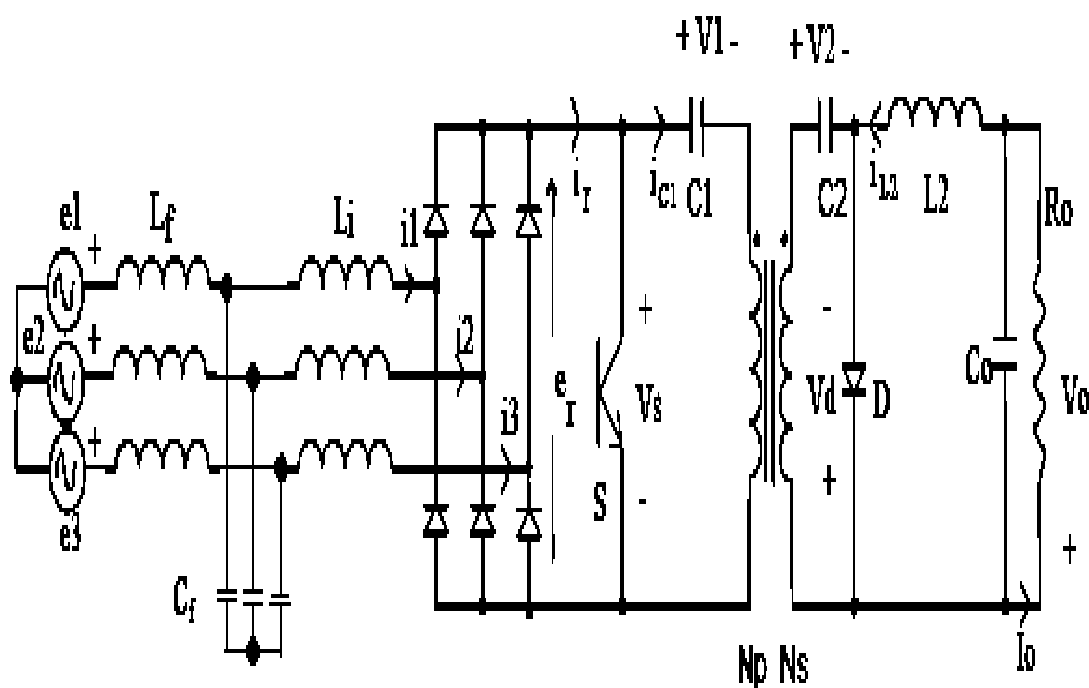


Fig. 2.14 CFP Trifásico con convertidor CUK aislado con un interruptor

El funcionamiento como corrector de factor de potencia ocurre con el circuito operando en frecuencia y ciclo de trabajo constante y con una corriente de entrada discontinua en cada inductancia L_i de entrada. El elevado contenido

armónico puede ser minimizado por la inclusión de un filtro capacitivo sumado a los inductores de entrada, de modo que la red absorba apenas la corriente media (componente de 60 Hz).

A manera de conclusión general de las topologías presentadas se cita lo siguiente:

- Utilizando un transformador como parte del circuito en conmutación es más eficaz aislar eléctricamente la entrada y la salida de un convertidor CD-CD; la frecuencia de conmutación mucho mayor que la frecuencia de la red eléctrica, por lo que se puede utilizar un transformador de dimensiones pequeñas.
- Para muchas aplicaciones prácticas, el aislamiento es necesario entre la entrada y salida. Además de por razones de seguridad, con un simple cambio de la razón de transformación se contribuye a obtener una salida reductora o elevadora. También se puede conseguir el cambio de polaridad en la tensión de salida sin más que cambiar las conexiones del transformador.
- Los convertidores: reductor-elevador, cuk, sepic y zeta implementan correctores de factor de potencia de forma natural con frecuencia y razón cíclica constante.

- Los convertidores elevador y reductor cuando trabajan con frecuencia fija y razón cíclica constante no ven a la carga como una resistencia, por lo que el factor de potencia no logra ser de valor unitario y por consecuencia, estos convertidores implementan correctores de factor de potencia no ideales.