Capítulo 4

Diseño del Circuito Propuesto

Las ecuaciones del sistema se presentan en este capítulo para las etapas en las que trabaja el circuito y que son importantes para la obtención de los valores de la fuente modular.

4.1 Introducción

Las diferentes etapas del Corrector de Factor de Potencia son deducidas mediante el análisis del circuito para una señal de CA como fuente de entrada. Por ello se recurre al uso de un interruptor bidireccional y se hace un análisis para ambos semiciclos de la señal de corriente alterna. El uso de un filtro de entrada es importante para la reducción de armónicos, que provocan que no se encuentre en fase la corriente y el voltaje hacia la entrada.

4.2 Filtro de Entrada

El filtro que se diseña es para reducir los armónicos que ocasiona la frecuencia de conmutación, diseñado a una frecuencia de corte inferior a la frecuencia de conmutación. Los elementos que lo conforman son la resistencia e inductancia de la línea y una capacitancia. Este filtro utiliza los valores de la inductancia y resistencia de la línea, así se obtiene el valor del capacitor [17]. La figura siguiente muestra la configuración del filtro para la fuente modular:

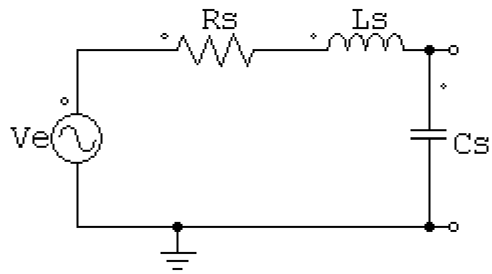

Fig. 4.1 Filtro de entrada

Se tienen las siguientes ecuaciones para el diseño del filtro.

- Función de Transferencia

$$H(s) = \frac{\omega_0^{\ 2}}{s^2 + \frac{s\omega_0}{Q} + \omega_0^{\ 2}} \tag{4.1}$$

- Definiendo a ω_0 como la frecuencia de corte

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_s C_s}} \tag{4.2}$$

- Por último a Q como el factor de calidad del filtro

$$Q = R_S \sqrt{\frac{C_S}{L_S}} \tag{4.3}$$

4.3 Análisis del Corrector de Factor de Potencia con fuente positiva

Debido a que se usa una fuente de CA para alimentar al circuito, es necesario hacer el análisis para el ciclo positivo y negativo. La célula del convertidor reductor-elevador está compuesta por un transistor seguido de un inductor, un diodo y un filtro capacitivo. Este circuito hará que el voltaje sea regulado:

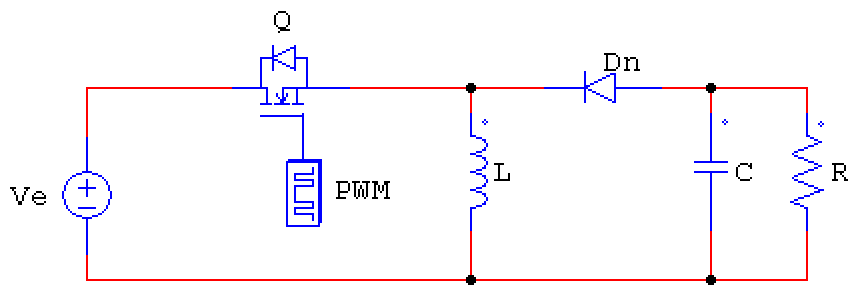

Fig. 4.2 Reductor-Elevador con fuente Positiva

En la función de transferencia puede observarse que puede trabajar como reductor o como elevador. Si $\alpha > 0.5$ el circuito es un elevador de voltaje pero si $\alpha < 0.5$ entonces se comporta como reductor.

Relación entre el voltaje de entrada y el voltaje de salida en un reductor-elevador

$$V_S = -V_e\left[\frac{\alpha}{1-\alpha}\right] \tag{4.4}$$

Cuando el transistor está encendido el diodo bloquea la corriente por lo que la inductancia queda en serie con la fuente CD:

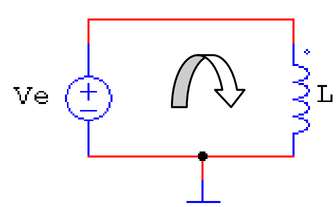

Fig. 4.3 Transistor encendido con fuente positiva

Si el transistor está apagado entonces se desconecta la fuente de la inductancia y se polariza el diodo directamente, respetando la polaridad con la que se cargó el inductor. El inductor se descargará en el capacitor y la resistencia. La figura 4.4 muestra el circuito correspondiente:

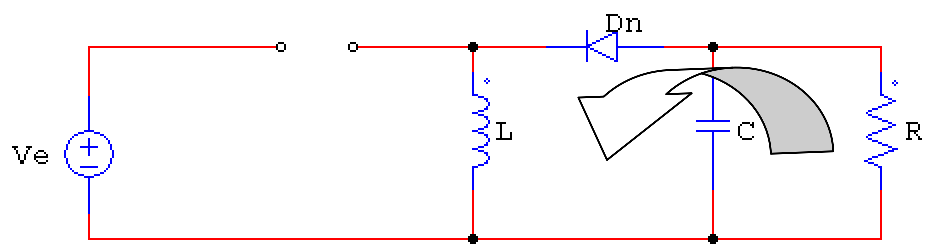

Fig. 4.4 Transistor apagado con fuente positiva

4.4 Análisis del Corrector de Factor de Potencia con fuente negativa

Durante el ciclo negativo el voltaje cambia de referencia ya que ahora se carga el inductor de manera opuesta a como lo hacía con fuente positiva, debido al sentido del diodo, colocado para que ahora conduzca con la polaridad del inductor. De igual forma se analiza el transistor encendido y apagado:

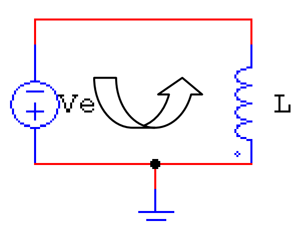

Fig. 4.5 Transistor encendido con fuente negativa

Por último en el transistor apagado con fuente negativa, se invierte la polaridad de la corriente en el inductor y la corriente fluye a través del diodo el capacitor y la carga. Figura 4.6.

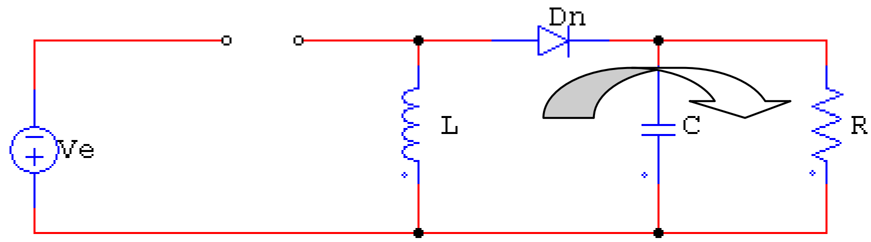

Fig. 4.6 Transistor apagado con fuente negativa

Ahora se puede entender mejor el planteamiento del convertidor cuando es alimentado por una fuente de CA que será modulada por ancho de pulso en el ciclo positivo y el negativo para obtener así corriente directa.

4.5 Celda de Conmutación

El planteamiento de la fuente positiva y negativa establece el paso de corriente en ambos ciclos de la fuente de CA hacia el convertidor. Para la conversión de energía alterna a directa es necesario un interruptor bidireccional en el cual fluya la corriente en ambos ciclos de la señal de entrada Figura 4.7. Este consiste en un rectificador en puente de onda completa al que se le va a sumar un transistor en paralelo, que usa un control PWM (Pulse Width Modulation) para disparar al dispositivo.

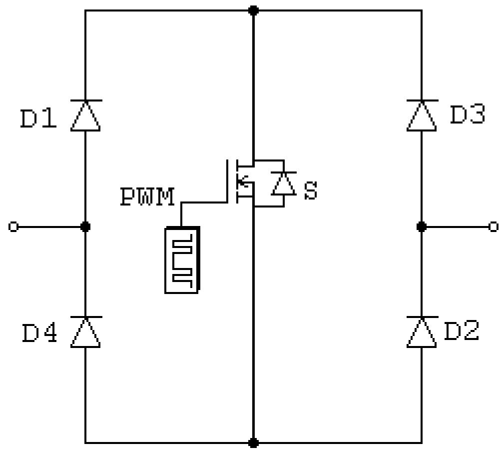

Fig. 4.7 Interruptor Bidireccional

De los conceptos anteriores se puede obtener el circuito corrector de factor de potencia para cada uno de los módulos de la fuente modular, compuesto por el interruptor bidireccional y el convertidor reductor-elevador que se puede ver en la figura 4.8.

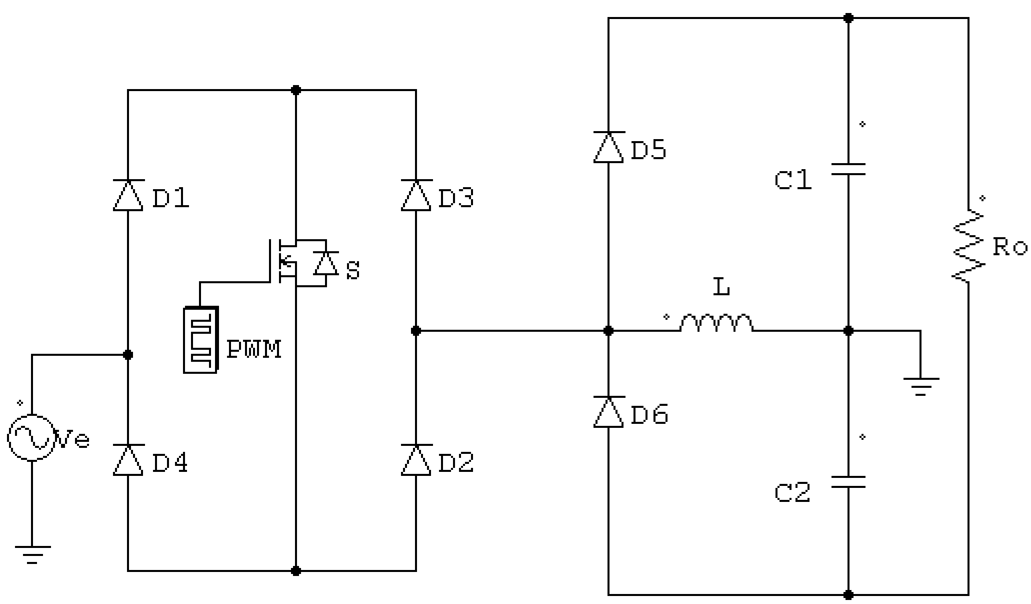

Fig. 4.8 Módulo CFP en conmutación dura

4.6 Ecuaciones del CFP modular

Las siguientes ecuaciones se obtienen para el caso que se tenga un solo módulo de potencia conectado a la carga. El análisis es en base al transistor abierto y cerrado. Para empezar se hace el análisis cuando el transistor está cerrado.

Cuando el transistor está cerrado y considerando que $V_e = V_m$ se establece la ecuación de malla:

$$V_e - L\frac{di}{dt} = 0 \tag{4.5}$$

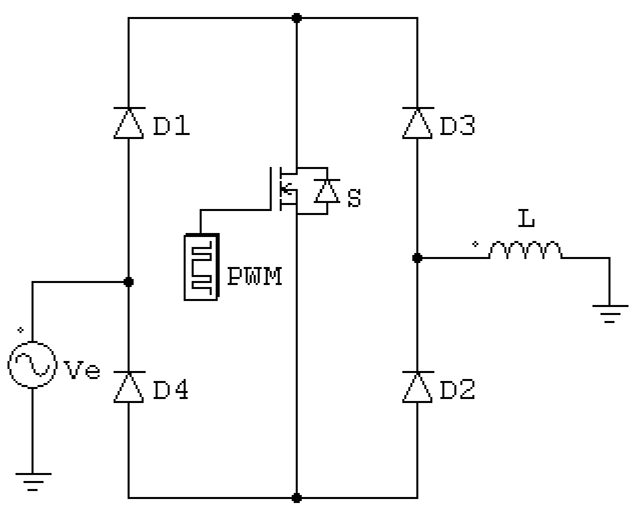

Fig. 4.9 Transistor cerrado e interruptor bidireccional

Para obtener la corriente máxima $I_{\max}$ mientras el transistor se encuentra cerrado, se evalúa $i(t)$ en el instante αT donde α equivale al ciclo de trabajo y T al periodo.

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_e}{L} \tag{4.6}$$

Resolviendo la ecuación diferencial obtenemos la corriente en función del tiempo:

$$i(t) = \frac{V_e t}{L} \tag{4.7}$$

La ecuación 4.8 representa a $I_{\max}$ al alcanzar el voltaje de entrada y la corriente máxima en el inductor mientras el interruptor está cerrado.

$$I_{\max} = \frac{\alpha T V_e}{L}$$
4.8)

Voltaje en los capacitores C_1 y C_2:

$$V_{C1} = \frac{V_s}{2}$$

$$V_{C2} = \frac{V_s}{2}$$
(4.9)

Por Ley de Ohm encontramos la corriente en los capacitores. Además se sabe que la corriente en el capacitor tiene polaridad inversa a la corriente de salida

$$I_{c1} = -i_s = \frac{-V_s}{R}$$

$$I_{c2} = -i_s = \frac{-V_s}{R}$$
(4.10)

La corriente en capacitor depende de la resistencia de carga y del voltaje de salida. Cuando el transistor se apaga existe un circuito abierto entre la fuente de entrada y la etapa de potencia sin embargo, existe energía almacenada en la inductancia debido a que se había cargando durante el tiempo αT. Por ello se puede apreciar la malla que se forma como se muestra en las siguientes ecuaciones y por leyes de voltaje de Kirchoff:

$$-V_L - V_{C2} = 0 \tag{4.11}$$

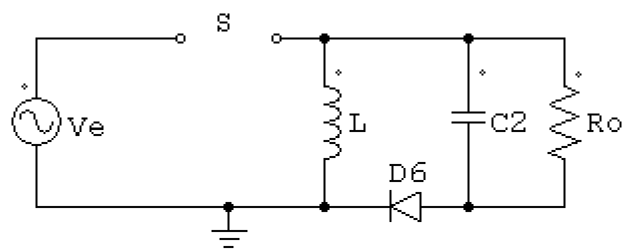

Fig. 4.10 Transistor Abierto

Resolviendo la ecuación diferencial se integra en ambos lados de la ecuación 4.11 se vuelve a despejar a la corriente en función del tiempo como en el caso del transistor cerrado. También se sabe que $V_{C2} = \frac{V_s}{2}$. La ecuación equivalente se observa en 4.12.

$$-\int L\frac{di}{dt} = \int V_{C_2} \tag{4.12}$$

$$i(t) = -\frac{V_s}{2L}(t) + I_{\max} \tag{4.13}$$

Se evalúa $i(t)$ para cualquier valor en el intervalo $[\alpha T, T]$

$$i(t) = -\frac{V_s}{2L}(t - \alpha T) + I_{\max} \tag{4.14}$$

Al sustituir la ecuación 4.7 en 4.13 se obtiene de nuevo a i(t) en 4.14

$$i(t) = -\frac{V_s}{2L}(t - \alpha T) + \frac{\alpha T V_e}{L}$$

(4.15)

El inductor trabaja en modo discontinuo por lo que existe un periodo donde la corriente en el inductor es cero hasta el resto del periodo. A partir de esta condición se puede evaluar la función $i(t)$ para ese instante, definiendo a la variable β de esta manera $i(\beta T) = 0$.

$$0 = -\frac{V_s}{2L}(\beta - \alpha)T + \frac{\alpha T V_e}{L}$$

(4.16)

Despejando a β de la ecuación 4.15 podemos obtener su valor matemático:

$$\beta = \alpha\left[\frac{2V_e + V_s}{V_s}\right]$$

(4.17)

Para trabajar en modo discontinuo se tiene que asegurar que $\beta T < T$, como se observa en la figura 4.11. De esta forma se asegura que no entre al modo continuo afectando al corrector de factor de potencia, por lo que al despejar β se llega a la condición que $\beta < 1$:

$$\alpha \frac{2V_e + V_s}{V_s} < 1$$

(4.18)

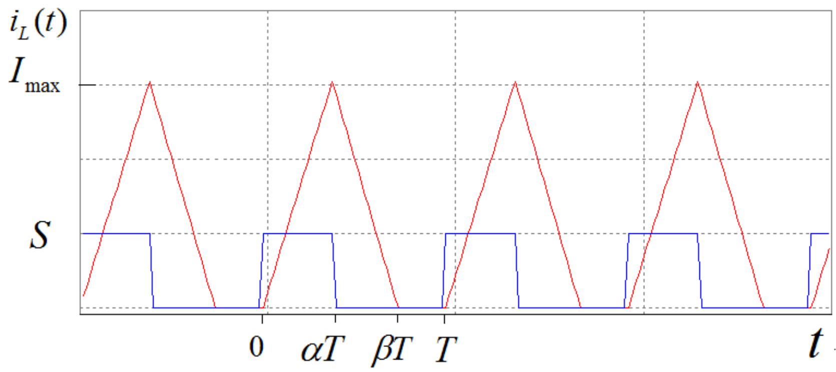

Fig. 4.11 Corriente en inductor

Se introduce un factor Q que asegurara las variaciones del voltaje de línea y si es igual a 1 entonces la ecuación se volverá una igualdad.

$$\alpha = \frac{V_s}{V_s + 2QV_e} \tag{4.19}$$

Si se despeja el voltaje de salida de la ecuación 4.19 se muestra como sigue:

$$V_s = 2QV_e\left[\frac{\alpha}{1-\alpha}\right] \tag{4.20}$$

Para la corriente de fuente se define el intervalo en el que existe corriente de la siguiente manera:

$$i_s = \begin{cases} \dfrac{V_m}{L}t & [0, \alpha T] \\ 0 & [\alpha T, T] \end{cases}$$

$\left[0,\alpha T\right]$

Se observa que la corriente de fuente se incrementa de manera lineal durante el intervalo $\left[0,\alpha T\right]$ y es cero para $\left[\alpha T,T\right]$.

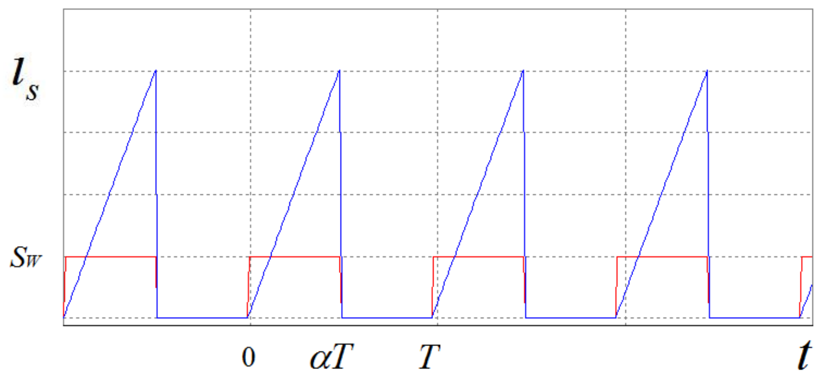

Fig. 4.12 Corriente de Fuente e interruptor

De la figura 4.12 se obtiene la corriente rms de fuente por medio de la siguiente ecuación:

$$i_{s_{rms}}^2 = \frac{1}{T}\int_0^{\alpha T} \frac{V_e{}^2 t^2}{L^2} dt \tag{4.21}$$

Y finalmente resolviendo la integral evaluada en el intervalo $\left[0,\alpha T\right]$ se puede expresar como se muestra a continuación:

$$i_{s_{rms}} = \frac{\alpha T V_e \sqrt{\alpha}}{L\sqrt{3}} \tag{4.22}$$

Otra forma de obtener el valor de la corriente de fuente para un rango de carga variable es suponer que la potencia de entrada sea igual a la de salida y así obtener una expresión de acuerdo a la potencia de salida. Si la potencia de entrada es igual a la potencia de salida ($P_e = P_s$) entonces $V_e I_e = V_s I_s$, y también se sabe que $P = \frac{V_s^2}{R}$ por lo que se puede sustituir y encontrar a la corriente rms de entrada.

$$V_e I_e = \frac{V_s^2}{R} \tag{4.23}$$

Así la corriente eficaz de entrada en términos de la potencia de entrada y salida se observa en la ecuación 4.23.

$$I_{e_{rms}} = \frac{V_s^2 \sqrt{2}}{V_e R} \tag{4.24}$$

Para obtener la variación en la corriente del inductor se deduce de los modos de operación del transistor cuando está encendido y apagado. La variación de la corriente deberá ser igual a $I_{\max}$. Como se ha visto anteriormente si el transistor está encendido se encuentra la fuente de alterna en serie con la inductancia hasta cargarse en un tiempo t_1:

$$V_e - V_L = 0$$

$$V_e = \frac{Ldi}{t} = \frac{L(I_{\max} - 0)}{t_1}$$

$$V_e = \frac{L\Delta l}{t_1}$$

Finalmente al obtener t_1 :

$$t_1 = \frac{L\Delta IL}{V_e} \tag{4.25}$$

Si el transistor está apagado entonces:

$$-V_L - \frac{V_s}{2} = 0$$
$$\frac{-L(0 - I_{\max})}{t_2} = \frac{V_s}{2}$$
$$\frac{L\Delta IL}{t_2} = \frac{V_s}{2}$$

Si se despeja t_2 queda de la siguiente manera:

$$t_2 = \frac{2L\Delta IL}{V_s} \tag{4.26}$$

Para obtener la variación de la corriente en el inductor de ambos ciclos del transistor se debe plantear como sigue:

$$T = \frac{1}{f} = t_1 + t_2 = \frac{L\Delta IL}{V_e} + \frac{2L\Delta IL}{V_s} \tag{4.27}$$

Simplificando la expresión:

$$\frac{1}{f} = \frac{L(V_s\Delta IL + 2V_e\Delta IL)}{V_eV_s}$$

De la cual debemos despejar ΔIL:

$$\Delta IL = \frac{V_eV_s}{fL(V_s + 2V_e)} \tag{4.28}$$

Si se sabe que el capacitor se carga en el intervalo $[\alpha T, \beta T]$ entonces podemos obtener el rizado de la tensión de salida del reductor-elevador, en base a la forma de onda de la corriente cuando comienza la descarga de la capacitancia sabiendo que son 2 capacitores:

$$|\Delta Q| = \left(\frac{V_s}{2R}\right)\alpha T = C\frac{\Delta V_s}{2}$$

(4.29)

De donde se despeja ΔV_s :

$$\Delta V_s = \frac{V_s \alpha}{RCf}$$

(4.30)

4.7 Circuito Equivalente con 2 Módulos

La idea es ver como quedan los elementos de ambos módulos cuando se conectan en paralelo hacia la carga. De igual forma se aplica un análisis cuando se tiene fuente positiva y negativa.

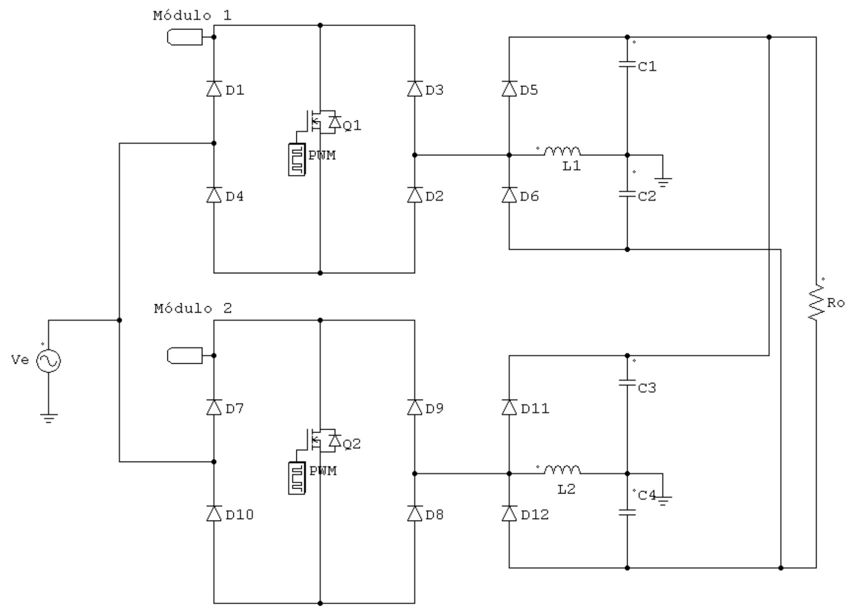

Fig. 4.13 Circuito con dos módulos hacia la carga

4.7.1 Modelo equivalente con fuente positiva y negativa

Como se puede ver, si están ambos transistores encendidos y conectados a la misma fuente de entrada se encuentran los inductores en paralelo figura 4.14, por lo que la inductancia equivalente se calcula de la siguiente forma:

$$\frac{1}{Leq} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \ldots \frac{1}{L_n} \tag{4.31}$$

Esto refleja que al tener dos módulos de potencia en paralelo hará que la inductancia se reduzca. Como consecuencia la corriente máxima del inductor equivalente es mayor que la de cada módulo y de esta forma se podrá almacenar la energía para transferirla hacia la carga.

Para el ciclo positivo de la señal sinusoidal ambos inductores se cargan como se muestra en la figura 4.14 respetando la polaridad de la corriente:

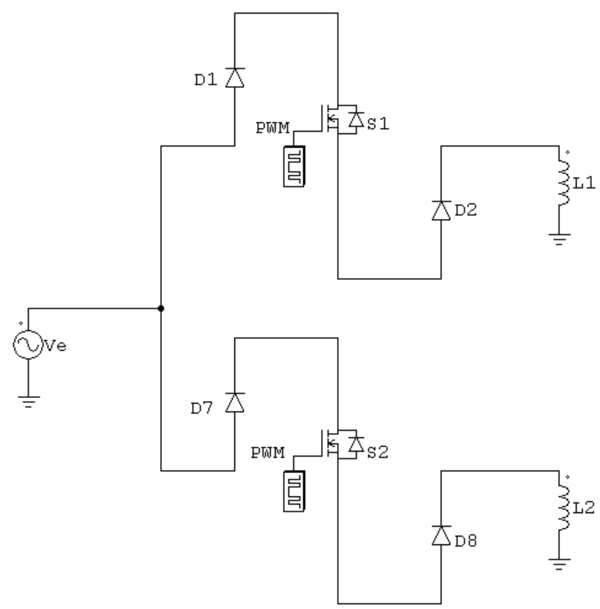

Fig. 4.14 Transistor encendido con 2 Módulos

Con lo que respecta a las ecuaciones de malla se pueden seguir utilizando las que se obtuvieron con un módulo conectado a la carga mientras el transistor esta encendido. Sin embargo, para los cálculos con 2 módulos se tendrá que considerar la inductancia equivalente para que los resultados sean con base a 1 módulo.

Cuando la señal de entrada está en el semiciclo positivo y los transistores apagados, se puede verificar la inductancia en paralelo que se forma al unir los 2 módulos hacia la carga. Por otro lado se puede ver la descarga de la inductancia en los capacitores C2 y C4 mientras conducen D6 y D12, obteniendo así la mitad del voltaje en la salida Figura 4.15. La otra mitad regresa por los capacitores C1 y C3.

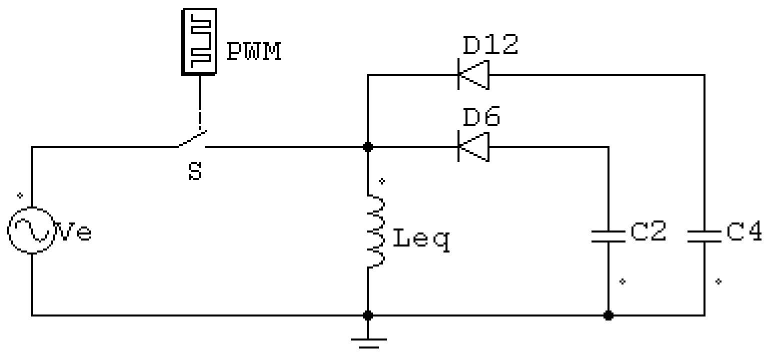

Fig. 4.15 Circuito equivalente con dos módulos y transistor apagado

En el caso de la fuente negativa cuando el transistor está encendido, sólo se invierte la polaridad con la que se carga el inductor equivalente y conducen el otro par de diodos del puente rectificador Figura 4.16.

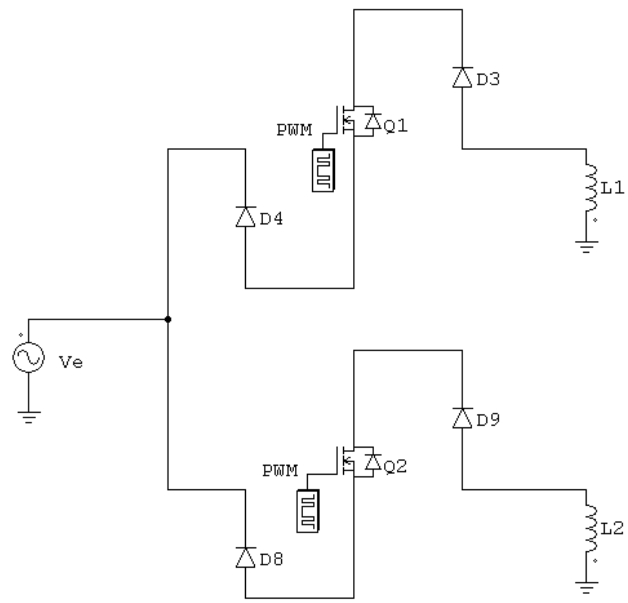

Fig. 4.16 Circuito equivlente en semiciclo negativo con transistor encendido

Por último es el caso donde el transistor está apagado y se tiene el semiciclo negativo, es importante observar que la polaridad indicará la manera en la que se va a transferir la energía hacia la carga. El arreglo queda como se muestra a continuación:

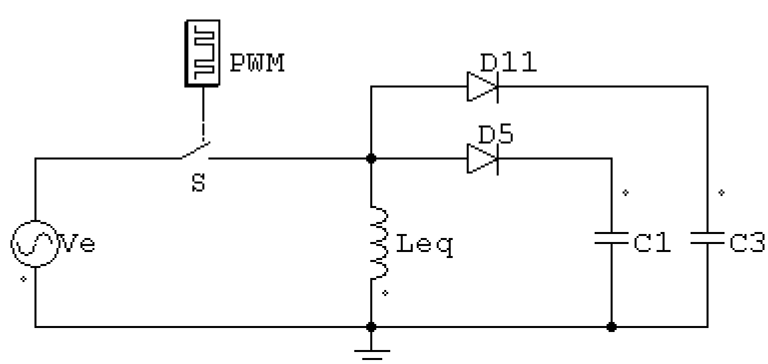

Fig. 4.17 Circuito Equivalente en semiciclo negativo y transistor apagado

4.8 Conclusiones

Se ha analizado el convertidor reductor-elevador que convertirá una señal de CA a CD para cada módulo de potencia y actuará como CFP. Se obtuvo el análisis para el modo discontinuo para cada inductor en los módulos. Por último se tienen las ecuaciones para poder modelar el comportamiento del reductor-elevador para conmutación dura dentro de la fuente modular.