

Capítulo 11

CONVERSORES COM CARGA INDUTIVA

11.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, iremos estudar os conversores com carga indutiva. O termo **conversor** é mais apropriado, pois a depender do ângulo de disparo, o circuito poderá operar como **retificador** ($\alpha < 90^\circ$) ou como **inversor** ($\alpha > 90^\circ$).

Nos circuitos que iremos analisar, haverá a possibilidade do fluxo de energia passar da carga para a rede e este fenômeno é conhecido como **regeneração**. A regeneração só ocorre no caso da carga poder armazenar energia (indutores, motores, baterias, etc.).

Podemos concluir, portanto, que a carga sendo indutiva, o circuito poderá operar como **retificador** (fluxo de energia da rede para a carga) ou como **inversor** (fluxo de energia da carga para a rede).

11.2 - CONVERSOR MONOFÁSICO CONTROLADO DE 1/2 ONDA COM CARGA INDUTIVA

Na figura 11.1, apresentamos o circuito do conversor monofásico controlado de 1/2 onda com carga indutiva.

Para carga indutiva, pelo fato da tensão e corrente não se encontrarem em fase, o tiristor não corta a 180° . O indutor desenvolve uma tensão que mantém o tiristor polarizado diretamente durante parte do semiciclo negativo.

No momento em que o indutor está desenvolvendo uma tensão contrária à anterior, a fim de manter o tiristor com polarização direta, está ocorrendo a devolução de energia armazenada no indutor para a rede. Este fenômeno é conhecido como **regeneração**.

Alguns elementos interferem no processo de regeneração, tais como: o **valor da indutância (L)**, o **valor da resistência da indutância (R)** e o **ângulo de disparo (α)**.

Quanto **maior for o valor da indutância**, maior será a energia que a mesma poderá armazenar e, portanto, maior será a **área de regeneração**.

Quanto **maior for a resistência da bobina**, menor corrente irá circular no circuito e menor energia será armazenada na mesma ($E_L = \frac{L \cdot I^2}{2}$), logo, **menor também será a área de regeneração**.

Quanto **maior for o ângulo de disparo**, menor será o tempo de armazenamento de energia pela bobina e, portanto, **menor será a área de regeneração**.

No circuito da figura 11.1, a tensão média na carga não poderá ser negativa, ou seja, não há condições da área de regeneração ser maior do que a área de armazenamento de energia. Neste caso o circuito só poderá operar como **retificador**.

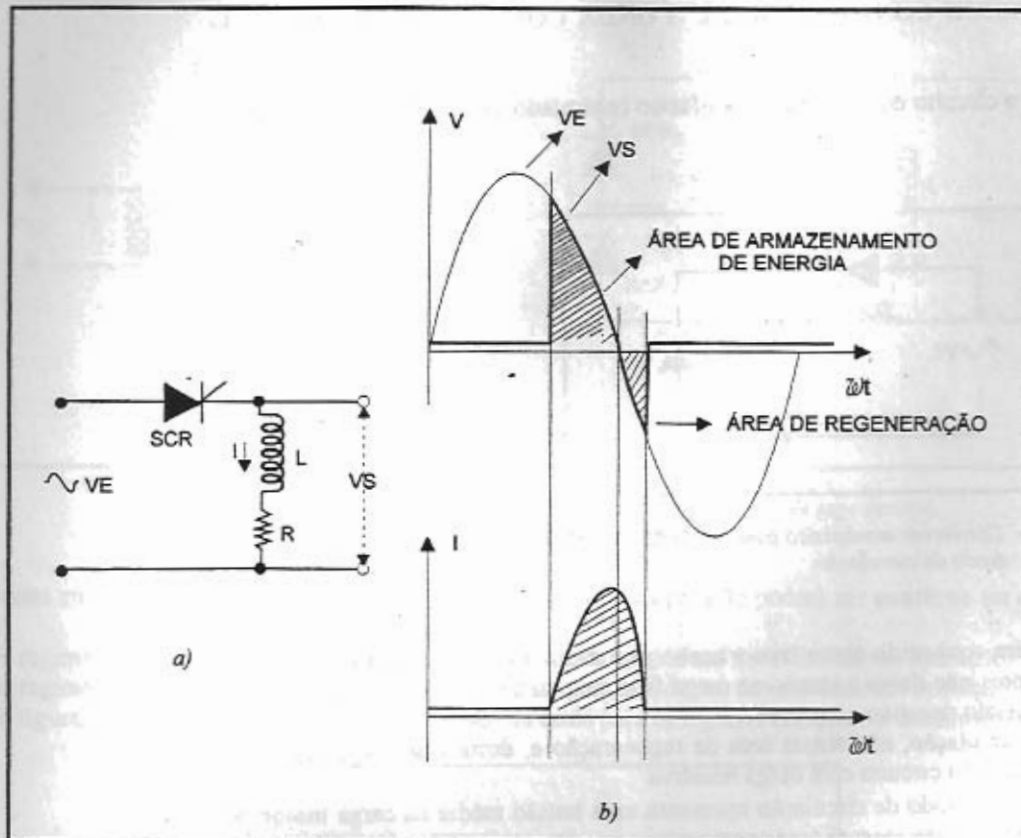


Fig.11.1 - a) Circuito do conversor monofásico controlado de 1/2 onda com carga indutiva.
b) Formas de ondas do circuito.

O valor médio de tensão na carga para o circuito da figura 11.1 é dado pela expressão:

$$V_{DC_L} = \frac{\alpha}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} V_{max} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t$$

$$V_{DC_L} = \frac{V_{max}}{2\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\beta}$$

$$V_{DC_L} = \frac{V_{max}}{2\pi} [\cos \alpha - \cos \beta] \quad 11.1$$

Através da expressão 11.1, podemos observar que o valor da carga irá modificar o valor da tensão média sobre a mesma. Isto irá ocorrer pelo fato do valor da carga modificar o ângulo de corte (β) do circui-

11.3 - CONVERSOR MONOFÁSICO CONTROLADO DE 1/2 ONDA COM DIODO DE CIRCULAÇÃO

Na figura 11.2 apresentamos o circuito do conversor monofásico controlado de 1/2 onda com o diodo de circulação.

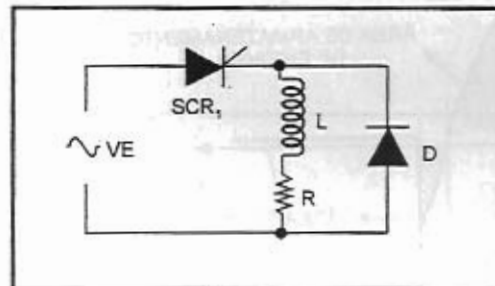


Fig. 11.2 - Conversor monofásico controlado de 1/2 onda com diodo de circulação.

O diodo de circulação é também conhecido como **free-wheeling** ou **diodo de recuperação**. Este diodo evita o fenômeno da regeneração, pois não deixa a tensão na carga ficar negativa o suficiente para o tiristor continuar conduzindo parte do semiciclo negativo.

Com a presença do diodo de circulação, não temos área de regeneração e, desta maneira, a forma de onda de tensão na carga se assemelha a do circuito com carga resistiva.

Para um mesmo α , o circuito com diodo de circulação apresenta uma tensão média na carga maior do que nos circuitos sem o mesmo, visto que não existirá área negativa.

O valor médio de tensão na carga, para o circuito da figura 11.2, é dado pela expressão:

$$V_{DC_L} = \frac{\int_{\alpha}^{\pi} V_{max} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t}{2\pi}$$

$$V_{DC_L} = \frac{V_{max}}{2\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi}$$

$$V_{DC_L} = \frac{V_{max}}{2\pi} [-(\cos \pi - \cos \alpha)]$$

$$V_{DC_L} = \frac{V_{max}}{2\pi} [1 + \cos \alpha] \quad 11.2$$

11.4 - CONVERSOR MONOFÁSICO CONTROLADO DE ONDA COMPLETA COM CARGA INDUTIVA

Na figura 11.3, apresentamos os circuitos dos conversores monofásicos controlados de onda completa. Podemos ter a configuração em ponte e a configuração com transformador de tape central.

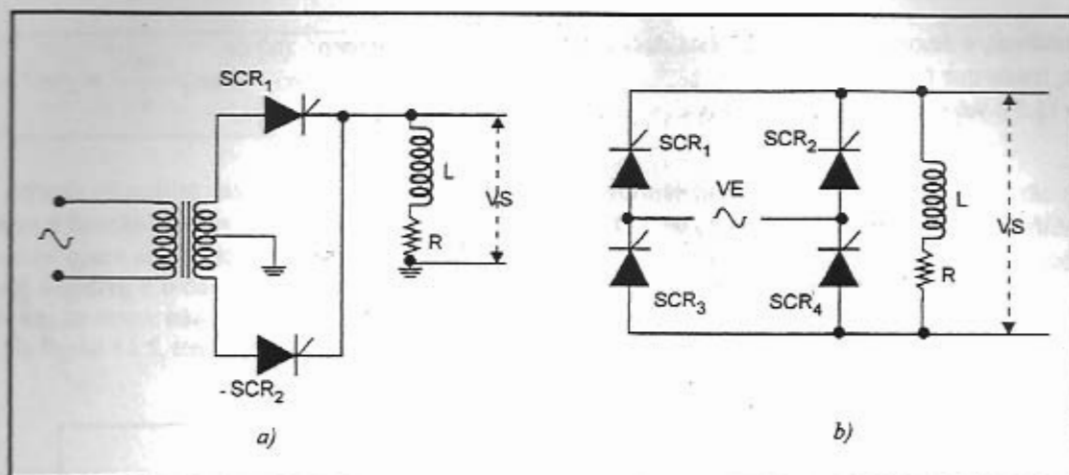


Fig. 11.3 - a) Conversor monofásico controlado com transformador de tape central.
b) Conversor monofásico controlado em ponte.

Nestes circuitos, a depender do valor do indutor, o regime de operação poderá ser **contínuo** ou **descontínuo**.

No regime contínuo, a regeneração é interrompida pela entrada de um novo tiristor em operação.

No regime descontínuo, a regeneração termina antes da entrada de um novo tiristor em operação.

Na figura 11.4, temos a forma de onda de tensão na saída para os regimes **contínuo** e **descontínuo**.

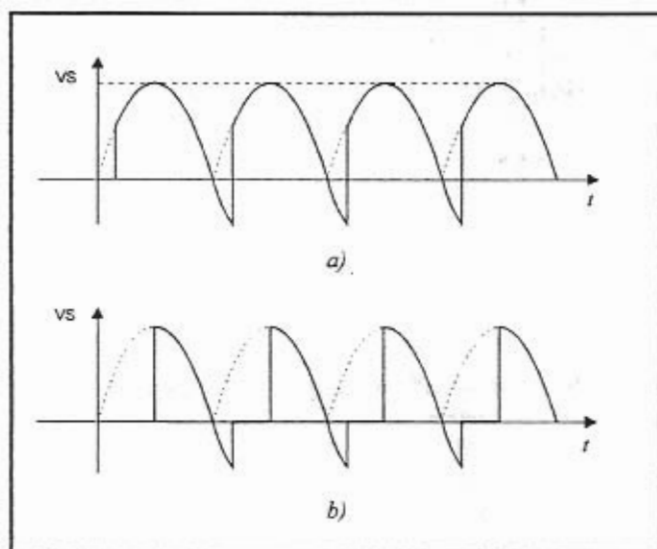


Fig. 11.4 - a) Forma de onda na saída para o regime contínuo.
b) Forma de onda na saída para o regime descontínuo.

No caso do regime contínuo, o valor da tensão média na carga é dado pela expressão:

$$V_{DC_L} = \frac{\int_0^\pi V_{max} \sin \omega t \cdot d\omega t}{\pi}$$

11.3

Pelo fato do regime ser contínuo, o ângulo de corte (β) está deslocado do ângulo de disparo (α) de 180° (vide figura 11.4.a), logo, temos que $\beta = \alpha + \pi$.

Substituindo na expressão 11.3 o valor de β temos:

$$V_{DC_L} = \frac{\int_{\alpha}^{\alpha+\pi} V_{max} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t}{\pi}$$

$$V_{DC_L} = \frac{V_{max}}{\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\alpha+\pi}$$

$$V_{DC_L} = \frac{V_{max}}{\pi} [-(\cos(\alpha + \pi) - \cos \alpha)]$$

Obs: $\cos(\alpha + \pi) = (\cos \alpha \cdot \cos \pi - \sin \alpha \cdot \sin \pi)$

$$V_{DC_L} = \frac{V_{max}}{\pi} [-(\cos \alpha \cdot \cos \pi - \sin \alpha \cdot \sin \pi - \cos \alpha)]$$

$$V_{DC_L} = \frac{V_{max}}{\pi} [-(-\cos \alpha - \cos \alpha)]$$

$$V_{DC_L} = \frac{2V_{max} \cos \alpha}{\pi} \quad 11.4$$

Sendo o regime descontínuo, o ângulo de corte (β) não terá uma relação conhecida com respeito ao ângulo de disparo (α), logo, o valor da tensão média na carga é dado pela expressão:

$$V_{DC_L} = \frac{\int_{\alpha}^{\beta} V_{max} \sin \omega t \cdot d\omega t}{\pi}$$

$$V_{DC_L} = \frac{V_{max}}{\pi} [-(\cos \omega t)]_{\alpha}^{\beta}$$

$$V_{DC_L} = \frac{V_{max}}{\pi} [-(\cos \beta - \cos \alpha)]$$

$$V_{DCL} = \frac{V_{max}}{\pi} [\cos \alpha - \cos \beta] \quad 11.5$$

Através da análise das expressões 11.4 e 11.5, podemos afirmar que, no regime contínuo, a tensão média na carga é função apenas do ângulo de disparo (α) e para $\alpha < 90^\circ$, a tensão média na carga é positiva e o conversor opera como **retificador** (fluxo de energia de rede para a carga). Para $\alpha > 90^\circ$, a tensão média na carga é negativa e o conversor opera como **inversor** (fluxo de energia da carga para a rede). Neste caso, temos um **inversor não autônomo**, ou seja, a frequência de saída do mesmo é sempre a frequência da rede. Na figura 11.5, temos as formas de ondas para a operação retificadora e inversora.

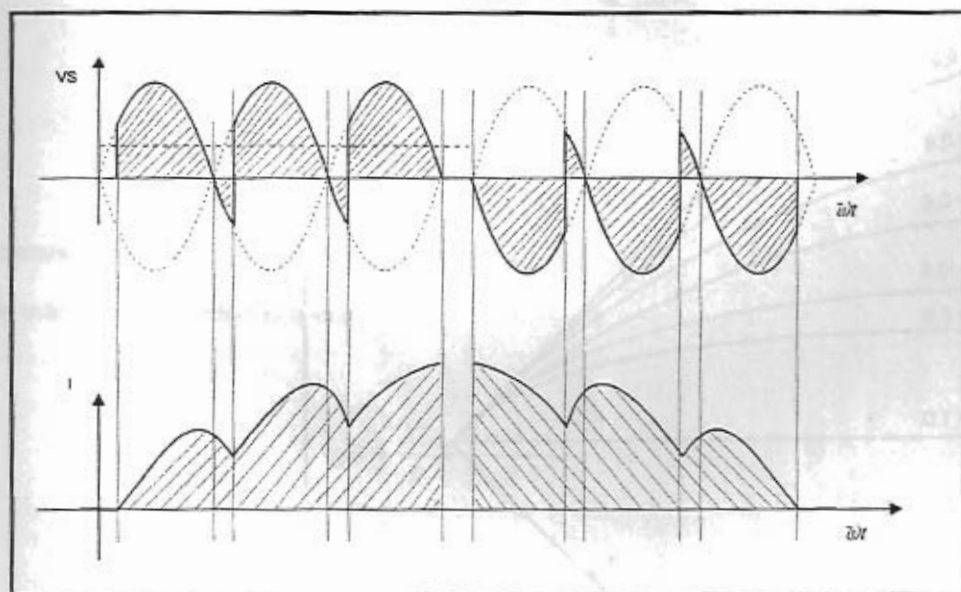


Fig. 11.5 - Formas de ondas para $\alpha < 90^\circ$ e $\alpha > 90^\circ$.

Através da figura 11.5, podemos observar que para $\alpha < 90^\circ$, as áreas positivas são maiores do que as áreas negativas e, portanto, o valor médio de tensão é **positivo**. No caso de $\alpha > 90^\circ$, as áreas negativas são maiores do que as áreas positivas, resultando em um valor médio de tensão **negativo**.

Vale a pena ressaltar que a operação inversora só poderá ser obtida, se o conversor operar em regime contínuo para $\alpha < 90^\circ$. O indutor vai armazenando energia aos poucos e poderá assim, permitir, que para $\alpha > 90^\circ$, as áreas de regeneração sejam maiores do que as áreas de armazenamento.

11.5 - Ábaco de Puschlowski

Para o cálculo do ângulo de corte nos conversores, utilizaremos o **ábaco de Puschlowski**, apresentado na figura 11.6.

No ábaco, temos na abscissa o valor correspondente ao ângulo de disparo (α). Na ordenada, temos o valor correspondente ao ângulo de corte (β). As diversas curvas de $\cos \theta$ correspondem ao cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão de entrada e a corrente no circuito.

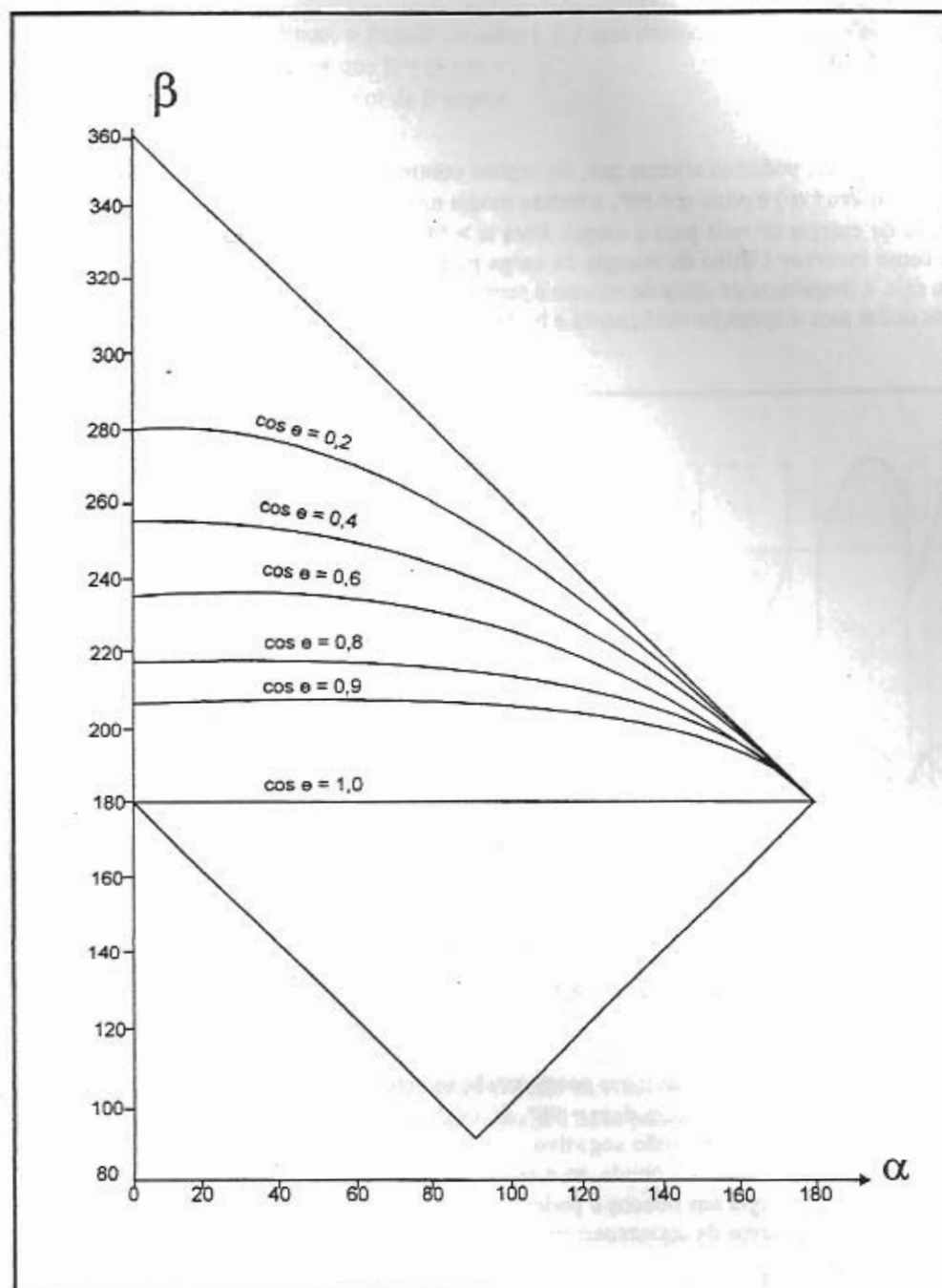


Fig. 11.6 - Ábaco de Puschlowski.

Para facilitar o entendimento na utilização deste ábaco, iremos utiliza-lo na resolução do exercício a seguir.

Exercício:

Calcule o ângulo de corte (β) e o valor da tensão média na carga para o circuito da figura 11.7, supondo um ângulo de disparo de 60° .

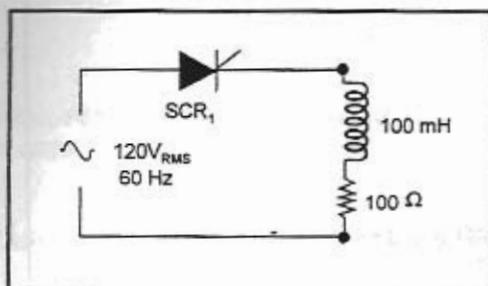
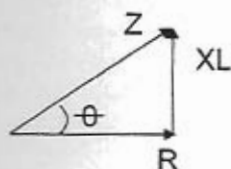


Fig. 11.7 - Conversor monofásico controlado de 1/2 onda.

Iniciaremos pelo cálculo do $\cos \theta$.

Pelo triângulo da impedância temos:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{XL}{R} = \frac{2 \cdot \pi \cdot F \cdot L}{R}$$



$$\operatorname{tg} \theta = \frac{2,314 \cdot 60 \cdot 100 \cdot 10^{-3}}{100}$$

$$\operatorname{tg} \theta = 0,38$$

$$\operatorname{arc} . \operatorname{tg} \theta = 20,8^\circ$$

O ângulo de defasagem é $\theta = 20,8^\circ$, logo, temos $\cos \theta = 0,93$.

Entrando no abaco, através de uma perpendicular ao ângulo de disparo solicitado (60°), e verificando o ponto de interseção desta perpendicular à curva $\cos \theta = 0,93$ (obtida através de uma aproximação). Projeta-se o ponto de interseção para o eixo da ordenada, obtendo, assim, o respectivo valor de ângulo de corte (β) (ve figura 11.8).

$$V_{DC_L} = \frac{120 \cdot \sqrt{2}}{6,28} [\cos 60^\circ - \cos 203^\circ]$$

$$V_{DC_L} = \frac{169,2}{6,28} [0,5 - (-0,92)]$$

$$V_{DC_L} = 38,26 \text{ V}$$

Concluimos, portanto, que o ábaco de Puschlowski é de fundamental importância para obtenção do ângulo de corte dos conversores com carga indutiva.

11.6 - CONVERSOR MONOFÁSICO CONTROLADO DE ONDA COMPLETA COM DIODO DE CIRCULAÇÃO

Na figura 11.9, temos o circuito do conversor monofásico controlado de onda completa com diodo de circulação.

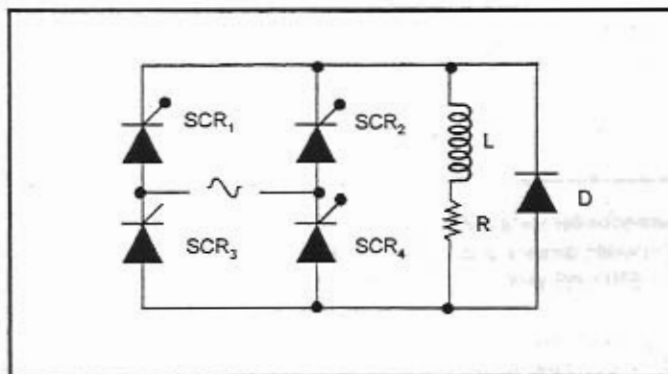


Fig.11.9 - Conversor monofásico controlado com diodo de circulação.

Em decorrência da presença do diodo de circulação não ocorre regeneração, pois a tensão na carga fica limitada em $-0,7\text{V}$ e toda energia do indutor é curto-circuitada por este diodo.

Quando temos a presença do diodo de circulação em um circuito, podemos concluir que **não há área negativa na carga**, logo, o valor da tensão média será maior.

11.7 - CLASSIFICAÇÃO DOS CONVERSORES QUANTO AO QUADRANTE DE OPERAÇÃO

Os conversores podem operar, dependendo de sua constituição, em um, dois ou quatro quadrantes.

Na figura 11.10 apresentamos o esquema destas operações

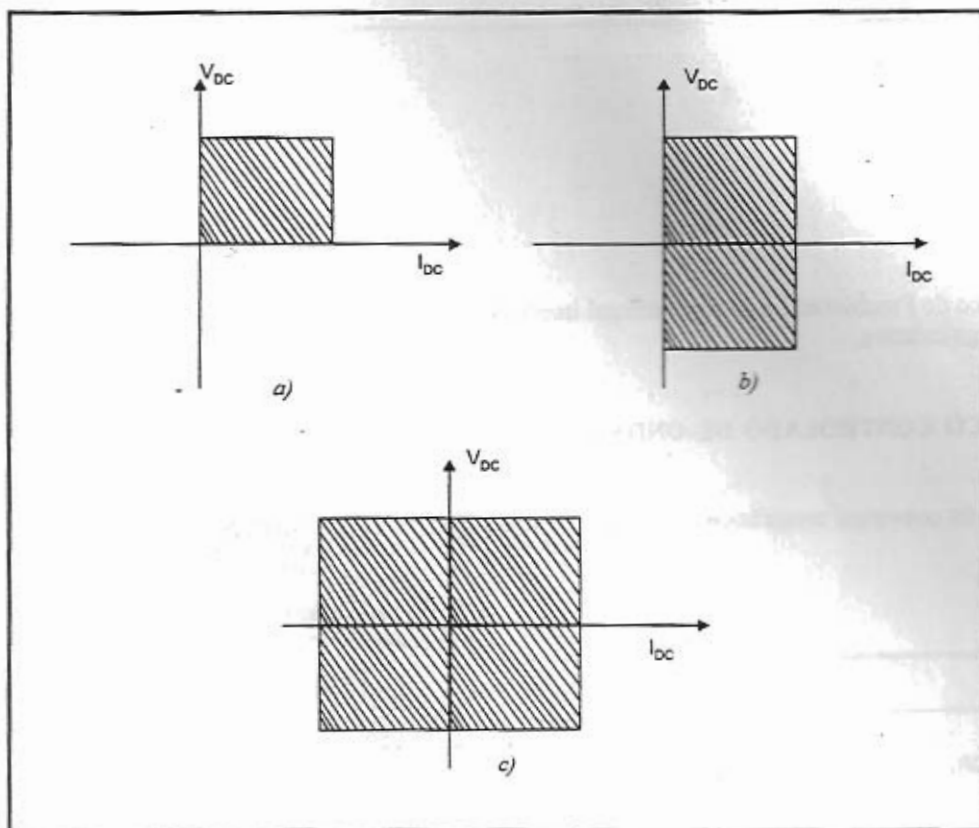


Fig.11.10 - a) Operação do conversor em um quadrante.
 b) Operação do conversor em dois quadrantes.
 c) Operação do conversor em quatro quadrantes.

Os conversores que apresentam valor médio de tensão e corrente na saída em apenas um sentido (positivo ou negativo), são chamados **unidirecionais**. O fluxo de energia nestes conversores é da rede para a carga (um único sentido).

Embora nos conversores unidirecionais possa ocorrer regeneração, as áreas de armazenamento de energia são sempre maiores ou iguais as áreas de regeneração, por este motivo, nunca temos a possibilidade da operação inversora.

11.8 - CONVERSOR MONOFÁSICO SEMICONTROLADO COM CARGA INDUTIVA

Nos conversores semicontrolados não teremos o fenômeno da regeneração, isto em decorrência dos aspectos que serão analisados através da figura 11.11.

No semiciclo positivo, devemos disparar o SCR_1 e este passará a conduzir junto com D_2 , que se encontra diretamente polarizado.

Quando a polaridade do sinal de entrada for invertida (vide figura 11.11.b) a carga, por efeito da indutância, inverte a polaridade de tensão na saída, mas a presença de D_1 , que entra em condução, e do SCR_1 , fazem com que a corrente passe através destes dois semicondutores, **sem afetar a rede**.

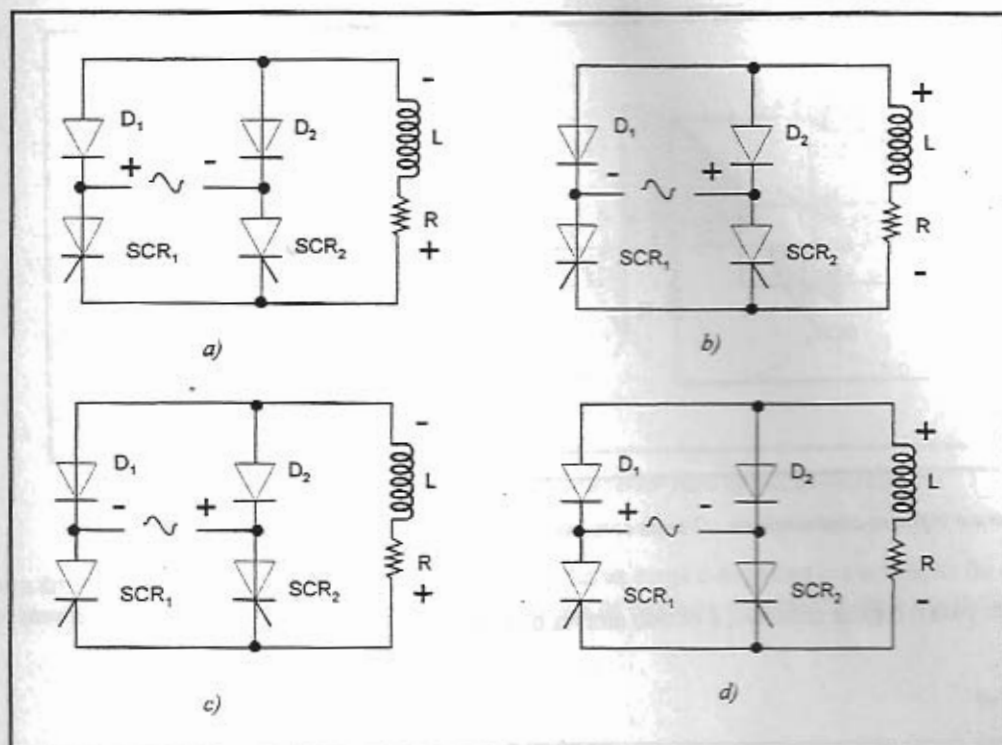


Fig. 11.11 - Etapas de operação do conversor monofásico semicontrolado.

Quando o SCR₂ é acionado, passa a conduzir juntamente com D₁ (vide figura 11.11.c). Na próxima inversão de polaridade da tensão de entrada, por efeito da indutância, a tensão na carga é invertida e D₂ passa a conduzir juntamente com o SCR₂, fazendo a corrente circular por estes dois semicondutores e não devolvendo, portanto, energia para a rede.

Podemos concluir que a energia do indutor, nos conversores semicontrolados, é lançada em um dos lados da ponte, portanto, a rede não sente este fenômeno, ou seja, não ocorre regeneração.

A ponte semicontrolada é mais vantajosa, pois apresenta um menor custo. Toda vez que a regeneração não for necessária, será dada preferência a esta configuração.

11.5 - CONVERSOR TRIFÁSICO CONTROLADO DE 1/2 ONDA COM CARGA INDUTIVA

Na figura 11.12, apresentamos o circuito do conversor trifásico controlado de 1/2 onda com carga indutiva.

Para ângulos de disparo inferiores a 30°, não há a possibilidade de ocorrência da regeneração, pois um tiristor é retirado de operação pela entrada de um novo.

Quando o ângulo de disparo é superior a 30°, ocorre a regeneração, pois surge um intervalo entre a saída de um tiristor e a entrada do tiristor seguinte. Este intervalo possibilita ao indutor devolver sua energia armazenada para a rede.

Assim como nos conversores monofásicos, os conversores trifásicos podem operar em regime contínuo ou em regime descontínuo.

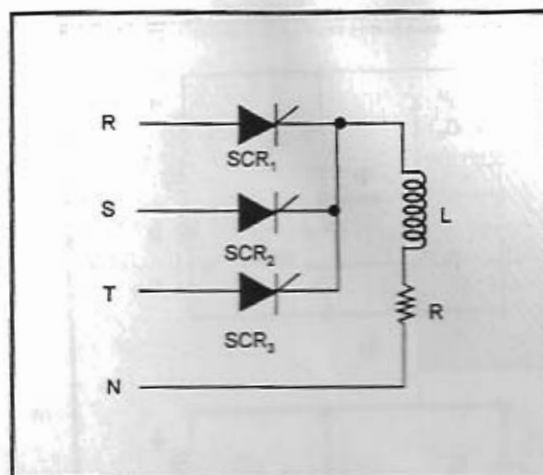


Fig.11.12 - Conversor trifásico controlado de 1/2 onda com carga indutiva.

O valor médio da tensão na carga, para o regime contínuo, é obtido através da seguinte expressão.

$$V_{DC_L} = \frac{\int_{(\alpha+30^\circ)}^{(\alpha+150^\circ)} V_{max_{FN}} \sin \omega t \cdot d\omega t}{\frac{2\pi}{3}}$$

$$V_{DC_L} = 0,83 V_{max_{FN}} \cdot \cos \alpha \quad 11.6$$

No caso do regime de operação descontínua, o valor médio de tensão na carga é dado pela expressão:

$$V_{DC_L} = \frac{\int_{(\alpha+30^\circ)}^{\beta} V_{max_{FN}} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t}{\frac{2\pi}{3}}$$

$$V_{DC_L} = \frac{3V_{max}}{2\pi} [\cos(\alpha + 30^\circ) - \cos \beta] \quad 11.7$$

Através de uma análise da expressão 11.6, podemos concluir que para ângulos de disparo (α) menores que 90° , a tensão média na carga é **positiva** e a operação do conversor é como **retificador**. Na figura 11.13, temos uma forma de onda na saída do conversor para a operação retificadora.

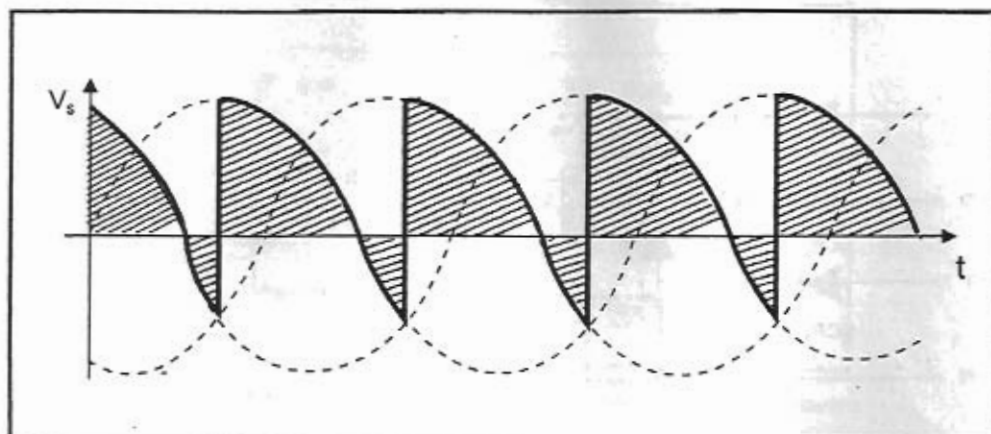


Fig. 11.13 - Forma de onda na saída do conversor para operação retificadora.

Para ângulos de disparo superiores a 90° , a tensão média na carga é **negativa** e a operação do conversor como **inversor**. Na figura 11.14, temos uma forma de onda na saída do conversor para a operação inverso-

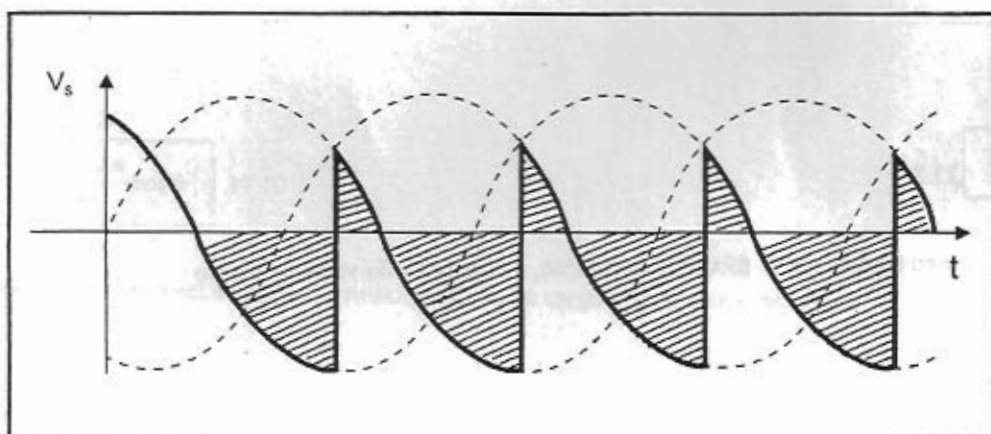


Fig. 11.14 - Forma de onda na saída do conversor para operação inversora.

11.10- CONVERSOR TRIFÁSICO CONTROLADO DE $\frac{1}{2}$ ONDA COM DIODO DE CIRCULAÇÃO

Na figura 11.15, temos o circuito do conversor trifásico controlado de $\frac{1}{2}$ onda com diodo de circulação.

A presença do diodo de circulação evita a regeneração, pois o diodo limita a tensão negativa na carga em $-0,7V$ e a corrente da carga circula pelo mesmo.

O diodo de circulação só atua para ângulos superiores a 30° , pois neste caso a tensão na carga inverte-se e passa a polarizar o mesmo diretamente.

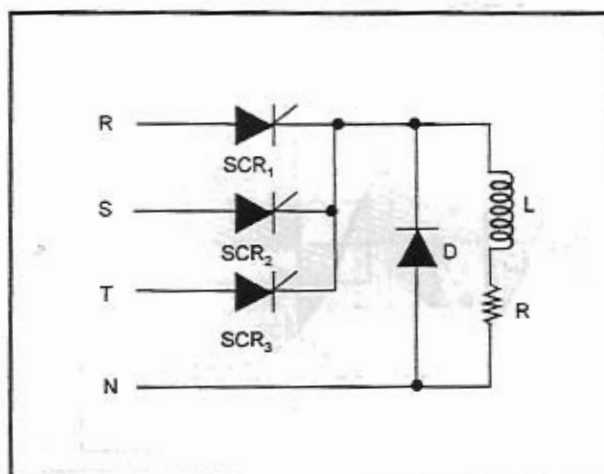


Fig.11.15 - Conversor trifásico controlado de 1/2 onda com diodo de circulação.

Neste conversor, o valor médio da tensão na carga, para o regime contínuo, é dado pela expressão:

$$V_{DC_L} = \frac{\int_{(\alpha+30^\circ)}^{(\alpha+150^\circ)} V_{max_{FN}} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t}{\frac{2\pi}{3}}$$

$$V_{DC_L} = 0,83 V_{máx_{FN}} \cdot \cos \alpha \quad 11.8$$

No caso do regime descontinuo e com a presença do diodo de circulação, a expressão do valor da tensão média na carga é dado por:

$$V_{DC_L} = \frac{\int_{(\alpha+30^\circ)}^{\pi} V_{max_{FN}} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t}{\frac{2\pi}{3}}$$

$$V_{DC_L} = \frac{3V_{max}}{2\pi} [1 + \cos(\alpha + 30^\circ)] \quad 11.9$$

11.11- CONVERSOR TRIFÁSICO CONTROLADO DE ONDA COMPLETA COM CARGA INDUTIVA

Na figura 11.16 temos o circuito do conversor trifásico controlado de onda completa com carga indutiva.

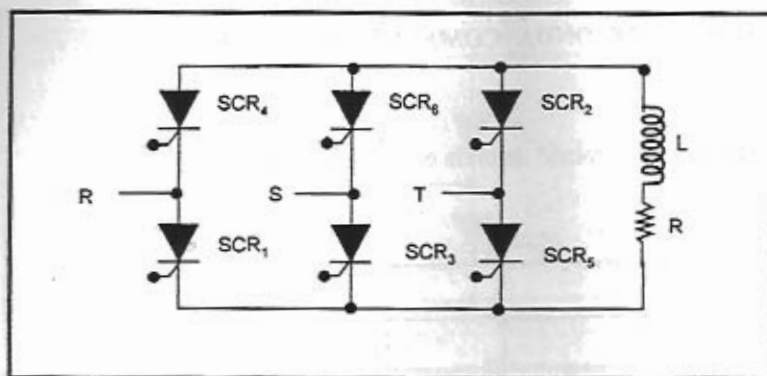


Fig. 11.16 - Conversor trifásico controlado de onda completa com carga indutiva.

Neste circuito, como é de nosso conhecimento, a tensão na carga é fase-fase e, por este motivo, o regime de operação só passa a ser descontínuo para $\alpha > 60^\circ$.

Como sabemos que a regeneração só poderá ocorrer quando houver intervalo entre a saída de um tiristor e a entrada do próximo, neste circuito, este fenômeno só ocorrerá para ângulos superiores a 60° .

O valor médio de tensão na carga, para o regime contínuo, é dado pela expressão:

$$V_{DC_L} = \frac{\int_{(\alpha+60^\circ)}^{(\alpha+120^\circ)} V_{max_{FF}} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t}{\frac{\pi}{3}}$$

$$V_{DC_L} = \frac{3V_{max_{FF}}}{\pi} \cos \alpha \quad 11.10$$

No caso do regime descontínuo, o valor médio de tensão na carga é dado pela expressão :

$$V_{DC_L} = \frac{\int_{(\alpha+60^\circ)}^{\beta} V_{max_{FF}} \sin \omega t \cdot d\omega t}{\frac{\pi}{3}}$$

$$V_{DC_L} = \frac{3V_{max_{FF}}}{\pi} [\cos(\alpha + 60) - \cos \beta] \quad 11.11$$

Como nos demais conversores, através da expressão 11.10 podemos verificar que ângulos de disparo inferiores a 90° , o regime de operação do conversor é como retificador (V_{DC_L} positivo) e para ângulos de disparo superiores a 90° , o regime de operação do conversor é como inversor (V_{DC_L} negativo).

11.12- CONVERSOR TRIFÁSICO CONTROLADO DE ONDA COMPLETA COM DIODO DE CIRCULAÇÃO

Na figura 11.17, temos o circuito do conversor trifásico controlado de onda completa com diodo de circulação.

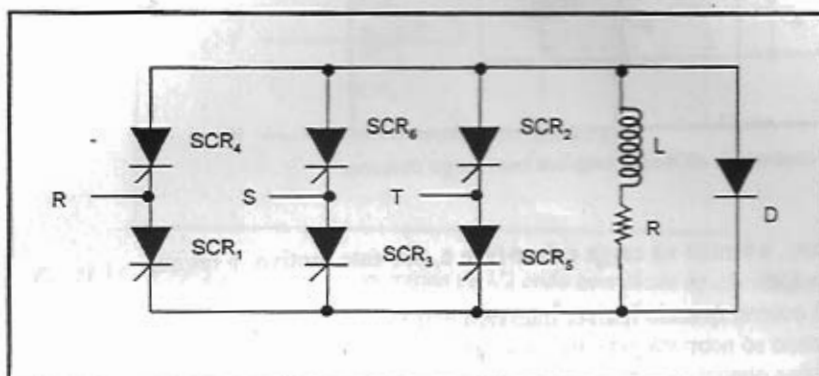


Fig. 11.17 - Conversor trifásico controlado de onda completa com diodo de circulação.

Neste conversor, não temos o fenômeno da regeneração, pois o diodo de circulação evita que a carga devolva energia para a rede.

O valor da tensão média na carga, para o regime descontinuo, é dado pela expressão:

$$V_{DCL} = \frac{\int_{(\alpha+60^\circ)}^{\pi} V_{maxFF} \cdot \text{Sen} \omega t \cdot d\omega t}{\frac{\pi}{3}}$$

$$V_{DCL} = \frac{3V_{maxFF}}{\pi} [1 + \cos(\alpha + 60^\circ)] \quad 11.12$$

No caso do regime contínuo, o valor médio de tensão na carga é dado pela expressão:

$$V_{DCL} = \frac{\int_{(\alpha+60^\circ)}^{(\alpha+120^\circ)} V_{maxFF} \cdot \text{Sen} \omega t \cdot d\omega t}{\frac{\pi}{3}}$$

$$V_{DCL} = \frac{3V_{maxFF}}{\pi} \cos \alpha \quad 11.13$$

11.13 - CONVERSOR TRIFÁSICO SEMICONTROLADO COM CARGA INDUTIVA

Na figura 11.18 apresentamos o circuito do conversor trifásico semicontrolado com carga indutiva.

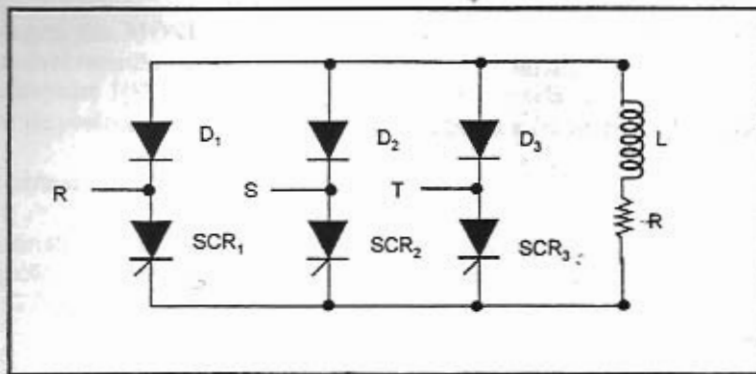


Fig.11.18 - Conversor trifásico semicontrolado com carga indutiva.

Nesta ponte, o mecanismo de funcionamento é análogo ao da ponte monofásica semicontrolada: os diodos conduzem naturalmente e os tiristores conduzem quando recebem sinal no gate.

É um conversor unidirecional, pois só pode operar como **retificador**, visto que o fenômeno da regeneração não ocorre.