

Capítulo 3

Conversão de tensão alternada em corrente contínua

Para conferir à energia retirada do rotor características que lhe permitam ser injectada na rede eléctrica é necessário introduzir um andar de corrente contínua no processo, antes de a tornar alternada através do conversor DC/AC.

Desta forma o conversor AC/DC é responsável por transformar a tensão do rotor com amplitude e frequência variáveis em corrente contínua.

Com a saída em corrente do conversor AC/DC é possível definir com clareza a forma de onda da corrente no rotor, garantido assim o seu conteúdo harmónico.

A única forma de garantir a forma de onda de corrente nas fases de um rectificador a díodos é conhecendo a forma de onda da corrente de saída. A bobine de alisamento colocada na saída garante que a corrente fornecida pelo rectificador (I_{dc}) é praticamente constante e independente da forma de onda da tensão de carga para onde a corrente está a ser dirigida (E_{dc}).

Os harmónicos da corrente no rotor devem ser minimizados de forma a diminuir as perdas e a minimizar os harmónicos injectados na rede através da corrente do estator da máquina uma vez que as correntes do rotor são reflectidas nas correntes do estator e injectadas na rede.

O *ripple* da tensão de saída do rectificador (V_{dc}) deve ser o menor possível para evitar o seu efeito no conversor DC / AC que se reflecte em oscilações de corrente à frequência das arcadas da tensão rectificada.

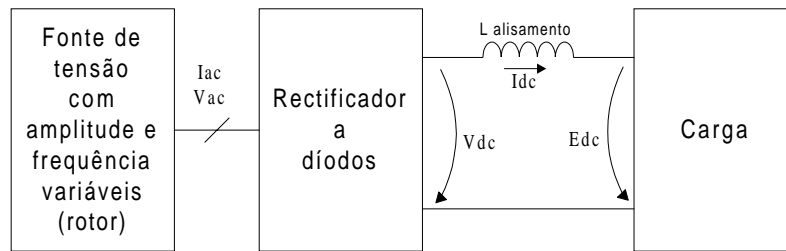


Figura 3.1 - Esquema genérico da conversão da tensão com amplitude e frequência variáveis em corrente contínua.

A Figura 3.1 apresenta um diagrama genérico da conversão.

A corrente contínua média (\overline{Idc}) depende dos valores médios das tensões rectificadas (\overline{Vdc}) e de carga (\overline{Edc}):

$$\frac{d Idc(t)}{dt} = \frac{1}{L_{alisa.}} (Vdc(t) - Edc(t)) \quad (3.1)$$

Se as tensões \overline{Vdc} e \overline{Edc} forem iguais a corrente \overline{Idc} permanece com igual intensidade. Se $\overline{Vdc} > \overline{Edc}$ a corrente continua sobe de intensidade, descendo se $\overline{Vdc} < \overline{Edc}$.

Naturalmente, a indutância de alisamento elimina (ou pelo menos atenua) a ondulação em $Idc(t)$ devido às variações de alta frequência existentes nas formas de onda de $Vdc(t)$ e $Edc(t)$.

Como o rectificador a díodos não é controlável, a tensão Vdc depende unicamente da tensão fornecida pelo rotor. Desta forma a corrente Idc tem de ser controlada pela tensão de carga Edc .

1 Fonte de tensão: Rotor da máquina assíncrona

A amplitude e a frequência da tensão aos terminais dos enrolamentos rotóricos de uma máquina assíncrona dependem unicamente (idealmente) da velocidade de rotação da máquina, da tensão de alimentação do estátor e da razão ($r = N_r/N_s$) entre o número de espiras do estátor (N_s) e do rotor (N_r).

Com a máquina parada a amplitude da tensão do rotor (V_r) é igual à do estátor (V_s) vezes a razão de transformação r . A frequência da tensão do rotor (f_{Vr}) é igual à frequência da tensão do estátor (f_{Vs}). A máquina neste caso funciona como um simples transformador do estátor (primário) para o rotor (secundário).

À medida que a velocidade cresce, V_r e f_{Vr} vão diminuindo, até que à velocidade de sincronismo V_r se anula.

A partir da velocidade de sincronismo, V_r e f_{Vr} vão aumentando, até que ao dobro da velocidade de sincronismo ficam iguais a V_s e f_{Vs} .

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$$

$$V_r = V_s \cdot |s| \tag{3.2}$$

$$fV_r = fV_s \cdot |s|$$

É necessário transformar estas tensões alternadas de amplitude e frequência variáveis em tensão contínua com o menor *ripple* possível de tensão na saída e com as correntes consumidas do rotor com um menor conteúdo harmónico possível.

Os harmónicos da corrente no rotor devem ser minimizados de forma a diminuir as perdas e a minimizar os harmónicos injectados na rede através da corrente do estator da máquina uma vez que as correntes do rotor são reflectidas nas correntes do estator.

Para o efeito é utilizada uma máquina assíncrona com dois enrolamentos rotóricos (um em estrela e outro em triângulo) a alimentarem dois rectificadores a diodos de forma que a corrente total equivalente do rotor vista pelo estator possua um conteúdo harmónico mais baixo do que o que seria possível obter com apenas um enrolamento a alimentar um rectificador a diodos.

2 Topologia dos rectificadores.

As duas montagens básicas trifásicas:

- Paralela Dupla 3 (PD3),
- Série 3 (S3),

introduzem na corrente alternada de entrada um conteúdo harmónico que se traduz numa perda de rendimento da máquina e na injeção de harmónicos na rede através do estator.

Como se observa nas figuras seguintes, as duas montagens produzem uma tensão rectificada (V_{dc}) com 6 arcadas por período e a diferença entre o máximo e o mínimo (*ripple*) de V_{dc} é de 14% do seu valor médio ($\overline{V_{dc}}$).

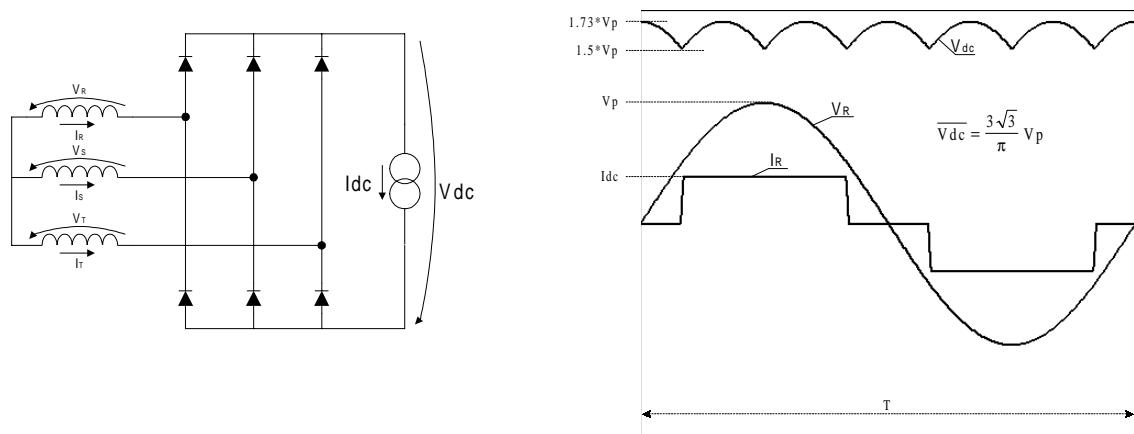


Figura 3.2 - Esquema da montagem Paralela Dupla 3 (PD3) e respectivas formas de onda.

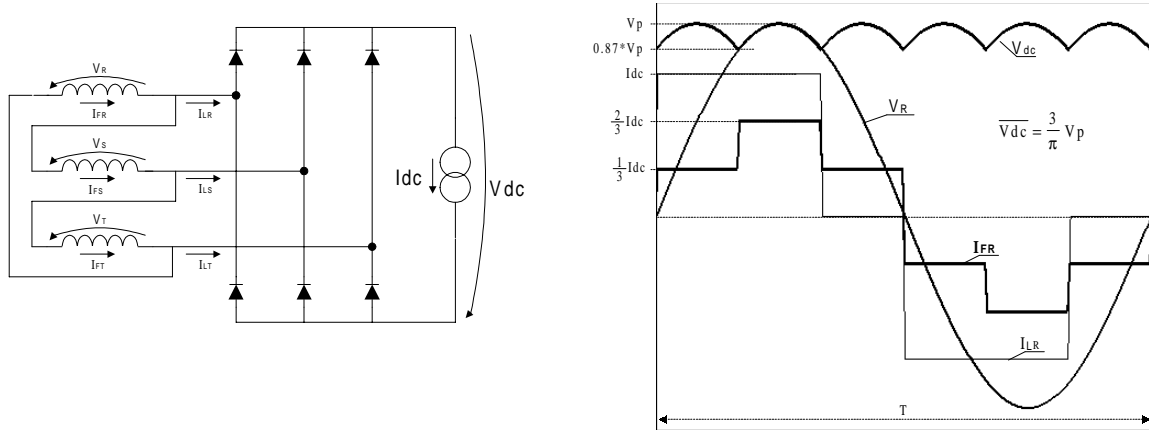


Figura 3.3 - Esquema da Série 3 (S3) e respectivas formas de onda.

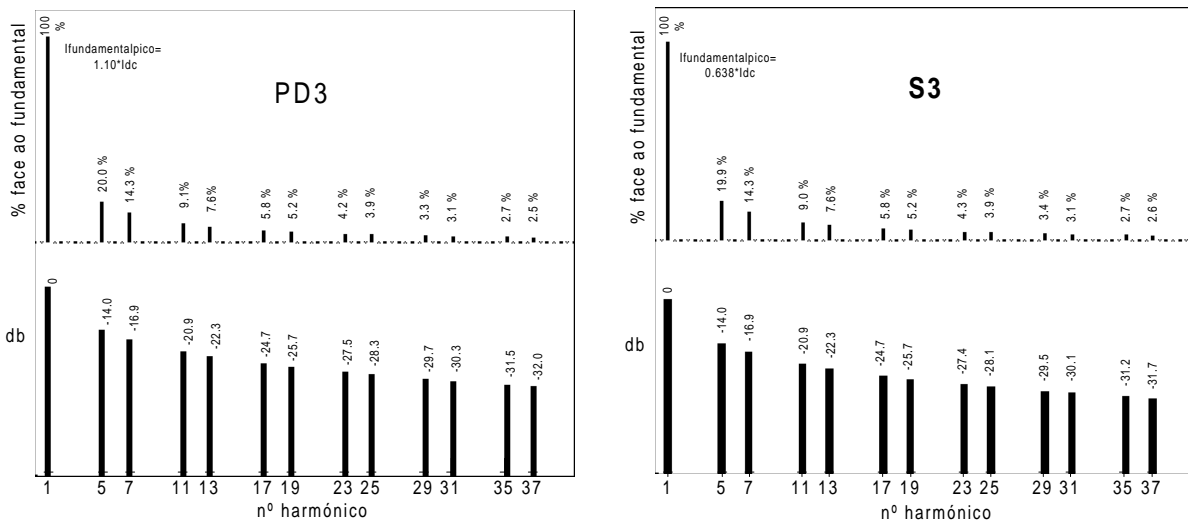


Figura 3.4 - Harmónicos da corrente nos enrolamentos das montagens S3 e PD3.

Como se observa na figura anterior o conteúdo harmónico da corrente nos enrolamentos é relativamente elevado nas duas montagens. Apesar da corrente nos enrolamentos da S3 ter uma forma de onda em escada, o seu conteúdo harmónico é muito semelhante ao da PD3.

Deve ser notado que no caso de montagens rectificadoras trifásicas a Paralela Dupla é igual à Série. A única coisa que muda é a montagem dos enrolamentos ser feita em estrela ou em triângulo. Como se sabe, um sistema em triângulo tem sempre o equivalente em estrela e vice-versa pelo que a corrente nas linhas é igual nos dois casos e a tensão rectificada média ($\overline{V_{dc}}$) pode ser dada sempre pela tensão composta do sistema (V_c):

$$\frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_c \cong 1.35 \cdot V_c \quad (3.3)$$

Apenas as correntes nos enrolamentos têm uma forma de onda e uma amplitude diferente.

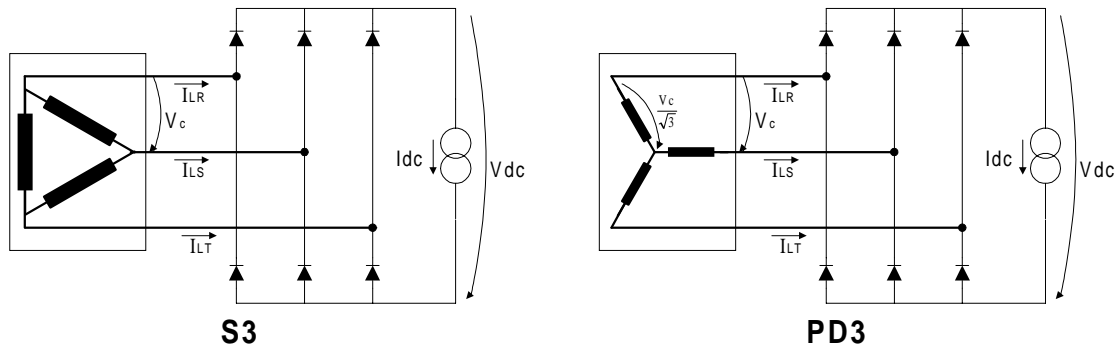


Figura 3.5 - A montagem dos díodos de um rectificador trifásico é igual no caso de ser uma montagem Paralela Dupla ou Série.

Para se reduzirem os harmónicos da corrente de entrada produzidos pelo conversor AC/DC é necessário recorrer a 2 rectificadores. Cada rectificador é alimentado por um conjunto de enrolamentos diferente. A corrente equivalente total em cada fase é o resultado da soma das correntes na fase respectiva de cada enrolamento conforme é exposto na figura seguinte.

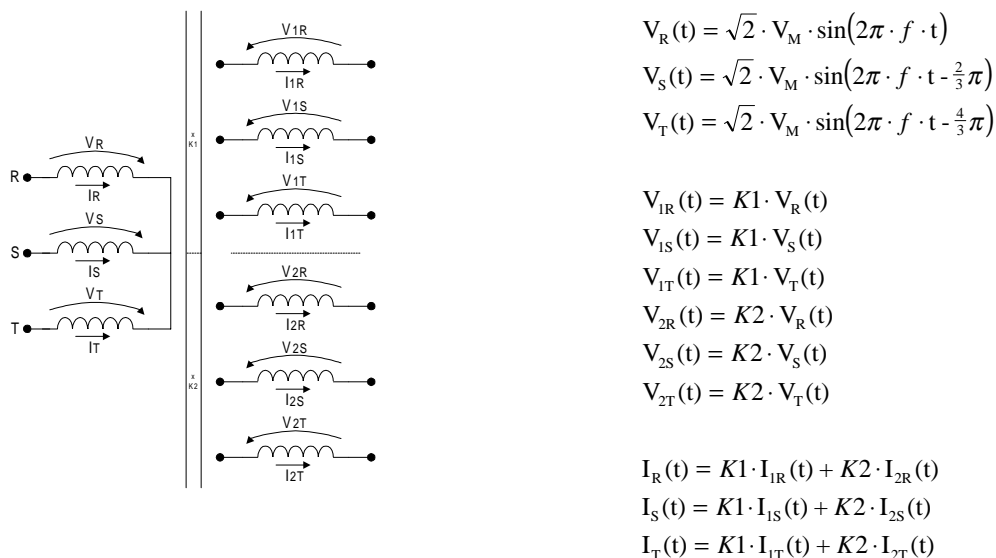


Figura 3.6 - Esquema do efeito das correntes dos enrolamentos secundários no enrolamento primário.

Para que a forma de onda da corrente no enrolamento primário (I_R) seja diferente da forma de onda das correntes nos enrolamentos secundários (I_{1R} e I_{2R}), é necessário que I_{1R} e I_{2R} tenham formas de onda diferentes. Caso contrário I_R seria exactamente igual a I_{1R} e I_{2R} a menos das constantes de ganho $K1$ e $K2$. Naturalmente o conteúdo harmónico de I_R também seria igual ao de I_{1R} e I_{2R} .

Isto impõe que a montagem dos dois enrolamentos secundários seja feita de modo diferente: um em estrela e outro em triângulo. Desta forma é apropriado usar uma associação de montagens PD3 e S3.

Para eliminar o 5º e 7º harmónicos da corrente no enrolamento primário, a relação entre as correntes dos dois enrolamentos do secundário “vistas” pelo primário deve ser de $\sqrt{3}$. Isto

significa que o enrolamento em triângulo deve ter $\sqrt{3}$ mais espiras que o enrolamento em estrela. Naturalmente a tensão gerada pelo enrolamento em triângulo vai ser $\sqrt{3}$ superior à tensão gerada pelo enrolamento em estrela.

Desta forma os dois enrolamentos do secundário formam um sistema trifásico idêntico e como é natural, a tensão composta (V_C) é igual levando a que a tensão rectificadora média ($\overline{V_{dc}}$) também o seja.

Aliás, isto é um imperativo no caso de os rectificadores serem montados em paralelo. A tensão de duas fontes de tensão ligadas em paralelo deve ser igual.

As figuras seguintes mostram o esquema da montagem e as correntes obtidas. Os dois rectificadores geram uma tensão (V_{DC1} e V_{DC2}) de valor médio igual mas com uma forma de onda diferente e debitam a mesma corrente I_{dc} .

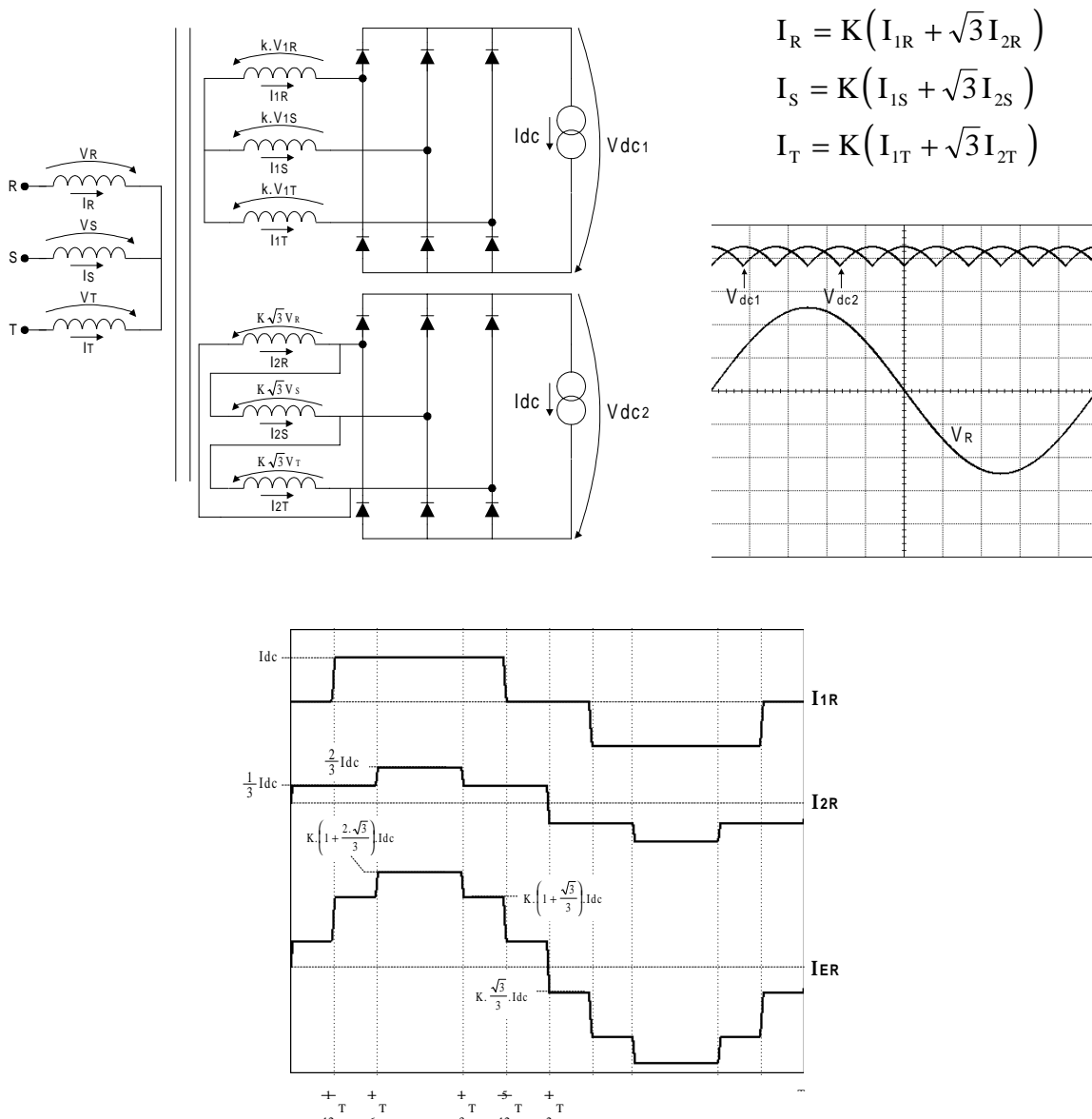


Figura 3.7 - Associação de rectificadores para eliminar os 5º e 7º harmónicos da corrente no primário e forma de onda de corrente obtida.

Da análise de Fourier da corrente I_R obtém-se a expressão¹ que indica o valor de cada harmónico de I_R em função de I_{dc} e K :

$$\text{harm}(nh)_{\text{rms}} = \frac{2}{3} \frac{I_{dc} \cdot k \left(\sqrt{3} - \sqrt{3} \cos(nh \pi) + 3 \cos\left(\frac{1}{6} nh \pi\right) - 3 \cos\left(\frac{5}{6} nh \pi\right) + \sqrt{3} \cos\left(\frac{1}{3} nh \pi\right) - \sqrt{3} \cos\left(\frac{2}{3} nh \pi\right) \right)}{nh \pi} \quad (3.4)$$

Apenas os harmónicos número:

$$nh = 12 \cdot i \pm 1; \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3.5)$$

são não nulos e possuem valor eficaz:

$$\begin{aligned} I_{\text{rms}}(nh) &= \frac{1}{nh} \frac{2\sqrt{2}\sqrt{3}}{\pi} \cdot I_{\text{DC}} \cdot K; \quad nh = 1, 11, 13, 23, 25, \dots \\ I_{\text{rms}}(12 \cdot i \pm 1) &= \frac{1}{12 \cdot i \pm 1} \frac{2\sqrt{2}\sqrt{3}}{\pi} \cdot I_{\text{DC}} \cdot K; \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, \dots \end{aligned} \quad (3.6)$$

O conteúdo harmónico (%) face à componente fundamental é dado por:

$$\begin{aligned} P_{nh}(nh) &= V_{\text{rms}}(nh) / V_{\text{rms}}(1) * 100 (\%) \\ P_{nh}(nh) &= 100 / nh (\%) \end{aligned} \quad (3.7)$$

O gráfico seguinte mostra o espectro dos harmónicos de I_R .

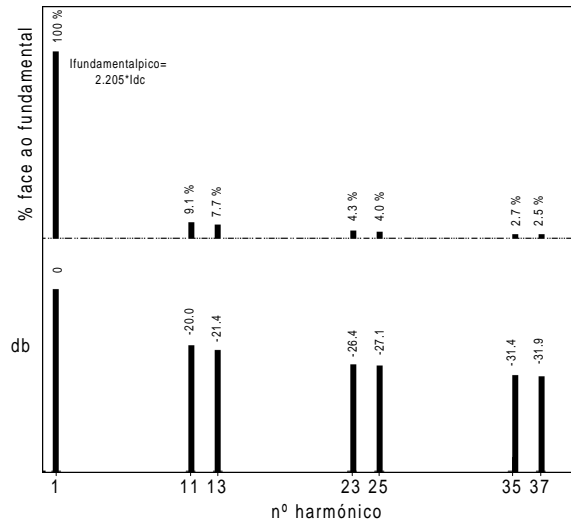


Figura 3.8 - Harmónicos da corrente no enrolamento primário de uma montagem rectificadora com um S3 e um PD3.

O valor eficaz da corrente I_R é dado por:

$$\begin{aligned} I_{\text{RMS}} &= \frac{1}{3} \sqrt{3} (\sqrt{3} + 1) I_{dc} \\ I_{\text{Rms}} &\cong 1.577 \cdot I_{dc} \end{aligned} \quad (3.8)$$

¹ A expressão foi obtida com a ferramenta de CAD matemático MAPLE V.

pelo que a taxa de distorção harmónica é dada por:

$$TDH = \frac{\text{Potencia harmonicos}}{\text{Potencia harm. fundamental}} = \frac{\text{RMS_total}^2 - \text{RMS_1_harm}^2}{\text{RMS_1_harm}^2}$$

$$TDH_{IR} = \frac{1}{18} \pi^2 + \frac{1}{36} \pi^2 \sqrt{3} - 1 \quad (3.9)$$

$$TDH_{IR} \cong 2.3\%$$

Resta agora decidir se os rectificadores são montados em série ou em paralelo.

Para montar os rectificadores em paralelo e manter a forma de onda da corrente na entrada, é necessário garantir que a corrente de saída dos rectificadores se mantém constante e nunca se anula.

Apesar do valor médio da tensão rectificada pelos dois rectificadores ser igual ($\overline{v_{dc}}$), a forma de onda é diferente num caso e noutro. Desta forma ao serem ligados em paralelo, vai existir uma corrente de circulação entre os dois rectificadores que vai fazer com que a corrente I_{dc} total seja fornecida unicamente pelo rectificador com maior tensão no momento. O díodo que deveria estar a conduzir no rectificador com a tensão mais baixa, é contrapolarizado pela tensão gerada pelo outro rectificador, pelo que deixa de conduzir.

Desta forma para se ligarem os rectificadores em paralelo é necessário introduzir uma bobine interfásica entre os dois rectificadores.

A corrente que cada rectificador fornece é metade da corrente total que passa no barramento DC. Naturalmente a tensão do barramento DC é em cada instante a média da tensão dos dois rectificadores e como é óbvio tem valor médio igual ao valor médio da tensão dos rectificadores.

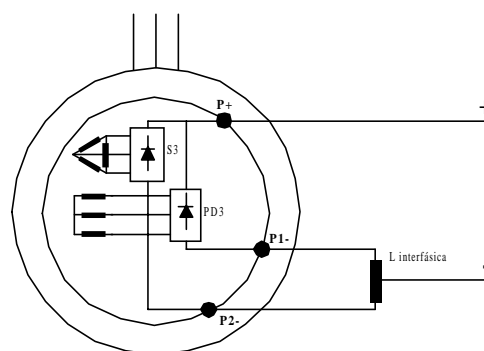


Figura 3.9 - Montagem em paralelo dos dois rectificadores através de bobine interfásica para limitar a corrente de circulação.

Na montagem em série a corrente de cada um dos rectificadores é igual à corrente total no barramento DC pelo que a sua forma de onda está garantida. A tensão do barramento DC é igual à soma das tensões dos dois rectificadores.

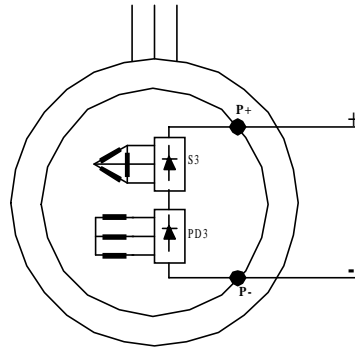


Figura 3.10 - Montagem em série dos dois rectificadores.

Para reduzir o número de anéis da máquina, os rectificadores são montados nos próprios anéis, ficando assim a rodar solidariamente com o rotor.

Na montagem em paralelo são necessários 3 anéis (pontos P+, P1- e P2- na Figura 3.9) para se efectuar a ligação ao exterior uma vez que a bobine interfásica não é colocada no rotor (obviamente devido ao seu volume, formato e peso).

No caso da montagem em série, dois anéis (pontos P+ e P- na Figura 3.10) são suficientes para realizar a ligação ao exterior.

Desta forma a montagem série seria a mais aconselhável uma vez que evitava o uso da bobine interfásica e requeria apenas dois anéis de ligação ao rotor.

No entanto, como a corrente que passa em cada um dos rectificadores na montagem série é o dobro da corrente nos rectificadores montados em paralelo, a dissipação de energia na montagem série é o dobro da dissipação da montagem paralela.

O cálculo da energia dissipada pode ser calculada de uma forma aproximada: num rectificador em cada instante existem sempre dois díodos a conduzir a corrente I_d . A queda de tensão em cada díodo (V_d) é aproximadamente de 1V. Desta forma a potência dissipada é dada por:

$$\text{montagem serie: } I_d = I_{dc}, \quad P_d = 2 \cdot ((V_d + V_d) \cdot I_d) = 4 \cdot V_d \cdot I_{dc} \quad (3.10)$$

$$\text{montagem paralelo: } I_d = \frac{I_{dc}}{2}, \quad P_d = 2 \cdot ((V_d + V_d) \cdot I_d) = 2 \cdot V_d \cdot I_{dc} \quad (3.11)$$

Para uma corrente no barramento DC de 500A a montagem série dissipa 2KW e a montagem paralelo 1KW.

Os projectistas da máquina assíncrona não garantiram ser possível evacuar todo o calor gerado pela dissipação de energia no caso da montagem série, pelo que foi decidido usar a montagem em paralelo.

O ganho K entre o primário e o secundário (razão entre o número de espiras do enrolamento do estator e do enrolamento em estrela do rotor) é unitária pelo que a tensão ($\overline{V_{dc}}$) fica com:

$$\overline{V_{dc}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_c \cong 1.35 * 380 \cong 500V \quad (3.12)$$

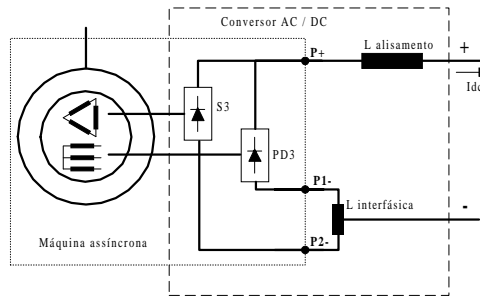


Figura 3.11 - Esquema do conversor AC/DC usado.

Desta forma o conversor AC/DC usado é constituído por dois rectificadores (um S3 e um PD3) ligados em paralelo através de uma bobine interfásica. Cada rectificador é alimentado por um conjunto de enrolamentos independente. Os rectificadores estão montados no rotor da máquina assíncrona que possui três anéis de ligação ao exterior e dois conjuntos de enrolamentos (um em estrela e um em triângulo). A bobine de alisamento garante que a corrente que os rectificadores fornecem ao andar seguinte do SRED é praticamente constante.

Com esta montagem o primeiro harmónico da corrente do estátor que surge é o 11º e tem uma amplitude de 9% da fundamental.

A forma de onda da tensão rectificadora (Vdc) é exposta na figura seguinte, onde se verifica que tem 12 arcadas por período e uma diferença entre o máximo e o mínimo de 3.4% do seu valor médio.

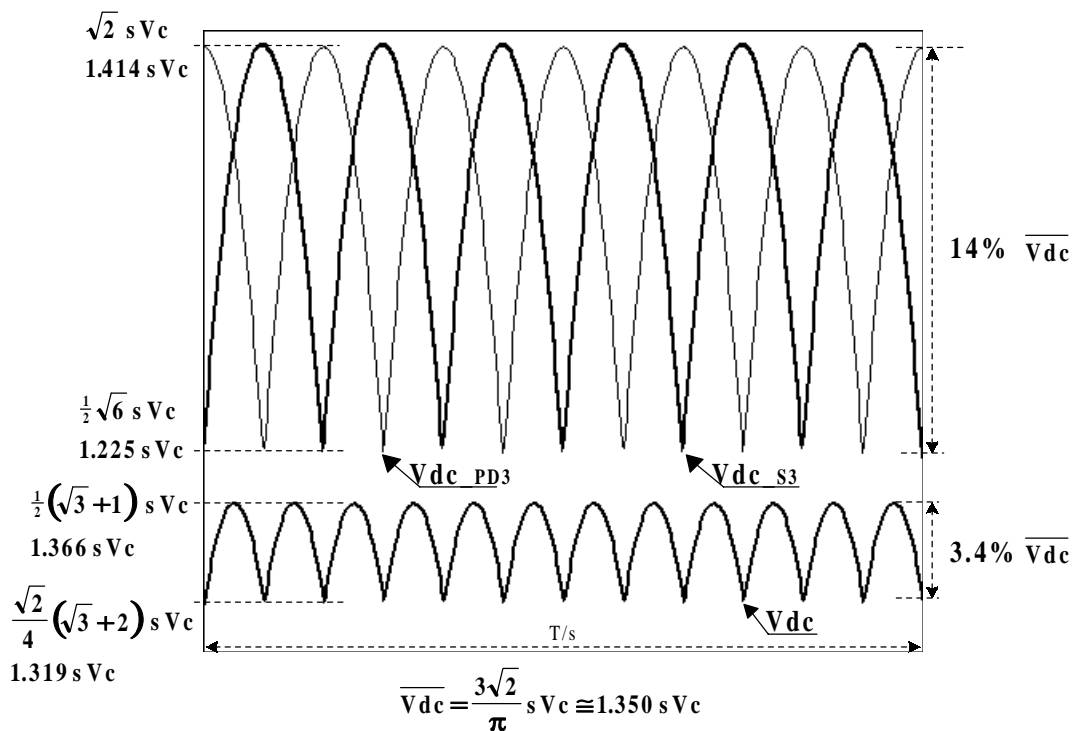


Figura 3.12 - Forma de onda da tensão rectificadora total (Vdc) e das tensões geradas pelos dois rectificadores: PD3 e S3. Vc é a tensão eficaz composta da alimentação do estátor e s é o deslizamento.

2.1 Cálculo da bobine interfásica do paralelo dos rectificadores

Para que a corrente de carga (I_{dc}) seja igualmente distribuída pelos dois rectificadores, é imperativo que as tensões médias ($\overline{v_{dc}}$) e as impedâncias de saída (Z) sejam iguais nos dois casos.

No caso dos rectificadores serem um S3 e um PD3, isto é conseguido se os enrolamentos que alimentam o S3 tiverem um número de espiras $\sqrt{3}$ vezes superior ao número de espiras dos enrolamentos que alimentam o PD3.

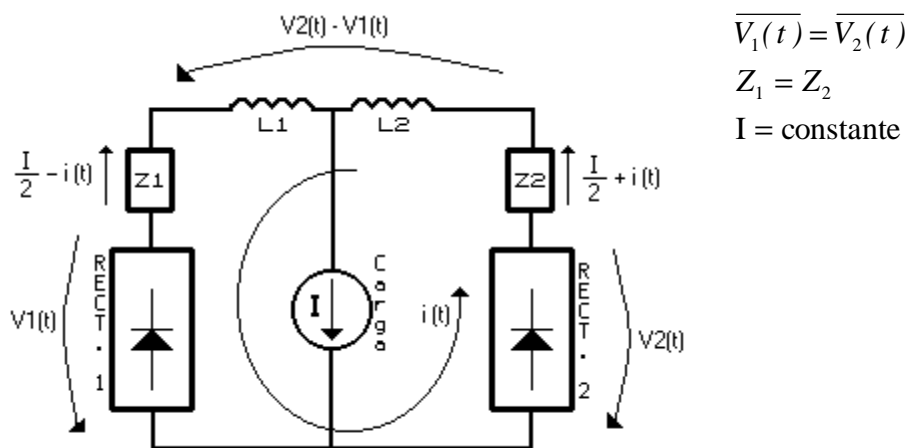


Figura 3.13 - Modelação do paralelo de duas fontes de tensão.

Apesar do valor médio das tensões geradas pelos rectificadores ser igual, a sua forma de onda não o é, pelo que a diferença de tensão ($v_d(t) = v_2(t) - v_1(t)$) provoca a existência de uma corrente de circulação ($i(t)$) entre as duas fontes de tensão.

Assim o rectificador 1 fornece a corrente $\frac{I}{2} + i(t)$ e o rectificador 2 a corrente $\frac{I}{2} - i(t)$.

A corrente de circulação $i(t)$ depende da diferença de tensão instantânea entre os dois rectificadores e do efeito conjunto das indutâncias L_1 e L_2 (indutância equivalente L).

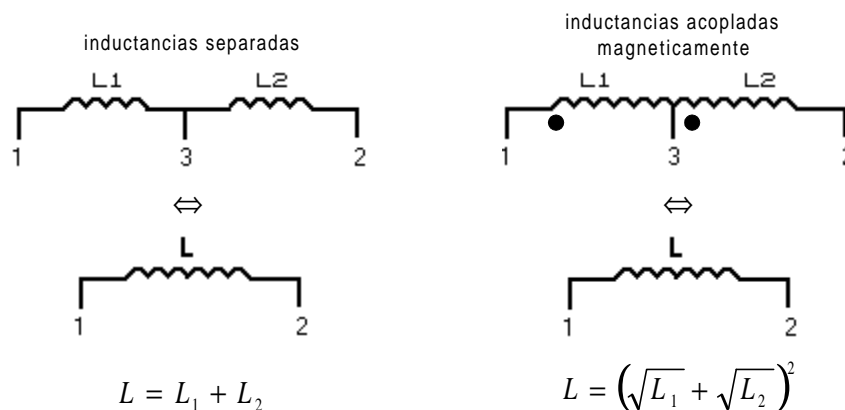


Figura 3.14 - Equivalente da associação das indutâncias L_1 e L_2 .

No caso de as indutâncias não estarem acopladas magneticamente, o efeito conjunto em $i(t)$ é dado pela soma algébrica de L_1 e L_2 .

No caso de as indutâncias estarem acopladas magneticamente, o efeito conjunto em $i(t)$ é dado por $L = (\sqrt{L_1} + \sqrt{L_2})^2$. Isto acontece porque a indutância é proporcional ao quadrado do número de espiras. Como $L_1 = L_2$, $L = 4.L_1$.

Para maximizar L , devem-se utilizar indutâncias acopladas magneticamente, i.é: uma indutância com tomada no ponto médio.

Neste caso, como L_1 e L_2 podem ser menores, a dinâmica do sistema é melhorada. Neste caso isto nem é desejável uma vez que se estas bobines não estiverem acopladas magneticamente ajudam a indutância de alisamento a tornar a corrente mais constante.

No entanto, se as bobines não estiverem acopladas magneticamente, têm de ser dimensionadas para uma corrente da ordem de grandeza da corrente de carga. Naturalmente isto encarece as indutâncias. Se utilizar apenas uma indutância com ponto médio, o fluxo produzido pelas correntes fornecidas nos dois anula-se, ficando apenas o fluxo originado pela diferença de correntes (corrente de circulação). Desta forma, a indutância tem de ser dimensionada apenas para a corrente de circulação. Por este motivo utiliza-se a bobine com ponto médio.

Para os rectificadores funcionarem de forma conveniente, a corrente que eles fornecem não se deve anular:

$$\frac{I}{2} \pm i(t) > 0$$

Desta forma a corrente de circulação deve ser sempre menor que metade da corrente de carga, pelo que é necessário garantir que:

$$\max[i(t)] < \frac{I}{2}$$

A corrente de circulação $i(t)$ é dada por:

$$v_d(t) = L \frac{d i(t)}{d t}$$

$$i(t) = \frac{1}{L} \cdot \int (v_2(t) - v_1(t)) d t \quad (3.13)$$

definindo K como:

$$K = \max \left[\int (v_2(t) - v_1(t)) d t \right] \quad (3.14)$$

obtêm-se:

$$\max(|i(t)|) = \frac{1}{L} * K$$

$$L = \frac{K}{\max(|i(t)|)} \quad (3.15)$$

O valor da indutância depende do máximo valor absoluto do integral da diferença de tensão entre os rectificadores e do máximo valor admissível para a corrente de circulação.

As tensões compostas do rotor (tensões dos enrolamentos da montagem série) são dadas por:

$$\begin{aligned} V_R(t) &= \sqrt{2} \cdot s \cdot Vc_{RMS} \cdot \text{sen}(2\pi \cdot fr \cdot s \cdot t) \\ V_S(t) &= \sqrt{2} \cdot s \cdot Vc_{RMS} \cdot \text{sen}(2\pi \cdot fr \cdot s \cdot t - \frac{2}{3}\pi) \\ V_T(t) &= \sqrt{2} \cdot s \cdot Vc_{RMS} \cdot \text{sen}(2\pi \cdot fr \cdot s \cdot t - \frac{4}{3}\pi) \end{aligned} \quad (3.16)$$

onde s representa o deslizamento da máquina:

$$s = \frac{\omega - \omega_s}{\omega_s} \quad (3.17)$$

O período das tensões rotóricas é dado por:

$$T = \frac{1}{fr \cdot s} \quad (3.18)$$

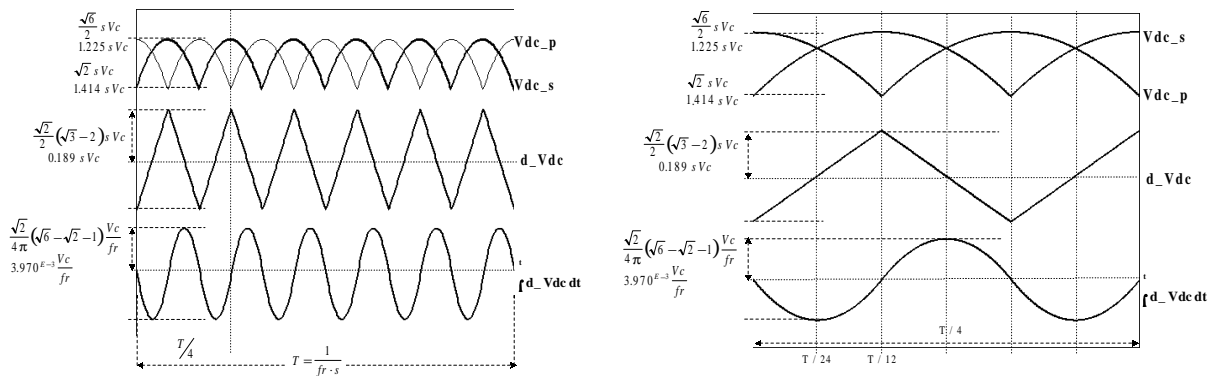


Figura 3.15 - Forma de onda da tensão de saída dos dois rectificadores (PD3: $V_1(t)$ e S3: $V_2(t)$), diferença de tensão entre os dois ($Vd(t)$), e integral da diferença. Vc é a tensão eficaz composta da alimentação do estator, s é o deslizamento e fr a frequência de alimentação.

A tensão $V_1(t)$ (Vdc de PD3) durante o primeiro $\frac{1}{12}$ de período é dada por:

$$V_1(t) = -\sqrt{3} \cdot V_S(t) \quad ; \quad t \in [0, \frac{1}{12}] \quad (3.19)$$

A tensão $V_2(t)$ (Vdc de S3) durante o primeiro $\frac{1}{6}$ de período é dada por:

$$V_2(t) = V_T(t) - V_S(t) \quad ; \quad t \in [0, \frac{1}{6}] \quad (3.20)$$

Assim a tensão aos terminais da bobine interfásica durante o primeiro $\frac{1}{6}$ de período é igual a:

$$V_d(t) = V_2(t) - V_1(t) = V_T(t) + (\sqrt{3} - 1) \cdot V_S(t) \quad ; \quad t \in [0, \frac{1}{12}] \quad (3.21)$$

Pela Figura 3.15 conclui-se que um dos pontos onde se dá o máximo absoluto do integral de $V_d(t)$ é em $\frac{T}{24}$.

Utilizando a ferramenta de CAD matemático Maple V, calcula-se o valor máximo absoluto do integral de $V_d(t)$ e portanto o valor de K:

$$K = \frac{\sqrt{2}}{4\pi} (\sqrt{6} - \sqrt{2} - 1) \frac{V_c}{fr} \quad (3.22)$$

Apesar das tensões serem dependentes do deslizamento (velocidade) da máquina o valor de K revelou-se independente desse valor, dependendo apenas da tensão e frequência de alimentação do estátor.

Isto acontece porque para valores de deslizamento baixos, o período de integração é alto e as tensões são baixas. Para valores de deslizamento altos o período de integração é baixo mas as tensões são altas havendo assim uma compensação.

Desta forma o valor da indutância é dado por:

$$L = \frac{\sqrt{2}}{4\pi} (\sqrt{6} - \sqrt{2} - 1) \frac{V_c}{fr} \frac{1}{\max[i(t)]} \quad (3.23)$$

Considera-se que o sistema em regime normal de funcionamento vai trabalhar com correntes I_{dc} superiores a 80A pelo que se considera a corrente de circulação máxima de 40A. Para uma tensão do estátor de 380V e uma frequência de rede de 50HZ, o valor da indutância interfásica é dado por:

$$L = \frac{0.03017}{\max[i(t)]} = 754\mu H \quad (3.24)$$

O valor medido da indutância usada é de 840 μ H o que dá uma corrente máxima de circulação de 36A e uma corrente mínima no barramento DC (I_{dc}) de 72A para um correcto funcionamento dos rectificadores.

Se a corrente I_{dc} for menor do que 72A, o rectificador com maior tensão instantânea vai conduzir toda a corrente I_{dc} e o conteúdo harmónico das correntes vai piorar uma vez que o 5º e o 7º harmónicos vão surgir.

3 Análise harmónica das correntes no estátor

Na secção anterior concluiu-se que a corrente rotórica total equivalente dos dois enrolamentos tem a forma de onda e conteúdo harmónico apresentado novamente na figura seguinte:

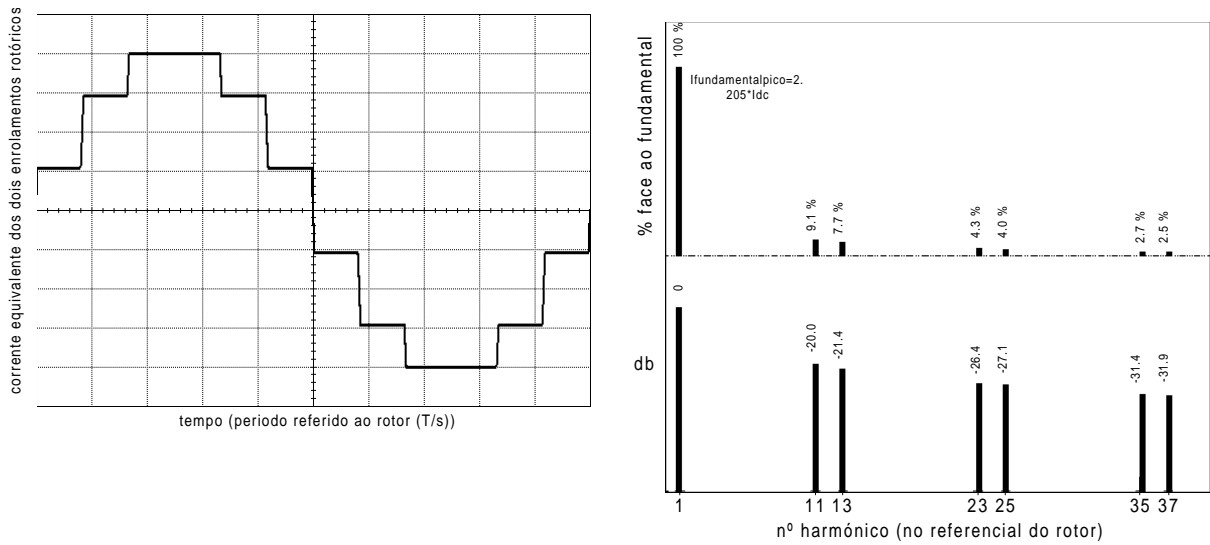


Figura 3.16 - Corrente total equivalente dos dois enrolamentos rotóricos.

A frequência fundamental das correntes rotóricas é dada por:

$$f_{R\ fund} = s \cdot f_{E\ fund} \quad (3.25)$$

onde s é o deslizamento e $f_{E\ fund}$ é a frequência de alimentação da máquina.

Os harmónicos da corrente rotórica têm uma frequência de:

$$f_R(nh) = nh \cdot f_{R\ fund} = nh \cdot s \cdot f_{E\ fund} \quad ; \quad nh = 1, 11, 13, 23, 25, 35, 37, \dots \quad (3.26)$$

Cada harmónico origina um campo girante no rotor:

$$\Omega(nh) = \frac{1}{p} \cdot nh \cdot s \cdot f_{E\ fund} \quad ; \quad nh = 1, -11, 13, -23, 25, -35, 37, \dots^1 \quad (3.27)$$

onde p é o número de pares de pólos da máquina.

O rotor, por sua vez, está a rodar à velocidade de:

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_s (1 - s) \\ \omega &= \frac{f_{E\ fund}}{p} (1 - s) \end{aligned} \quad (3.28)$$

Desta forma o campo girante criado pelo harmónico nh , das correntes rotóricas, é visto pelo estátor a rodar à velocidade de:

$$\Omega_{ER}(nh) = \Omega(nh) + \omega = \frac{1}{p} nh \cdot s \cdot f_{E\ fund} + \frac{1}{p} f_{E\ fund} (1 - s)$$

¹ O sinal negativo indica que o campo girante criado pelo respectivo harmónico roda em sentido contrário ao campo criado pela fundamental.

$$\Omega_{ER}(nh) = \frac{1}{p} f_{E_fund} (1 + s \cdot (nh - 1)) \quad (3.29)$$

Desta forma, o harmónico número nh das correntes do rotor tem no rotor uma frequência de:

$$f_R(nh) = nh \cdot f_{R_fund} \quad ; \quad nh = 1, 11, 13, 23, 25, 35, 37, \dots \quad (3.30)$$

e provoca no estator uma corrente com frequência de:

$$f_{ER}(nh) = f_{E_fund} (1 + s \cdot (nh - 1)) \quad ; \quad nh = 1, -11, 13, -23, 25, -35, 37, \dots \quad (3.31)$$

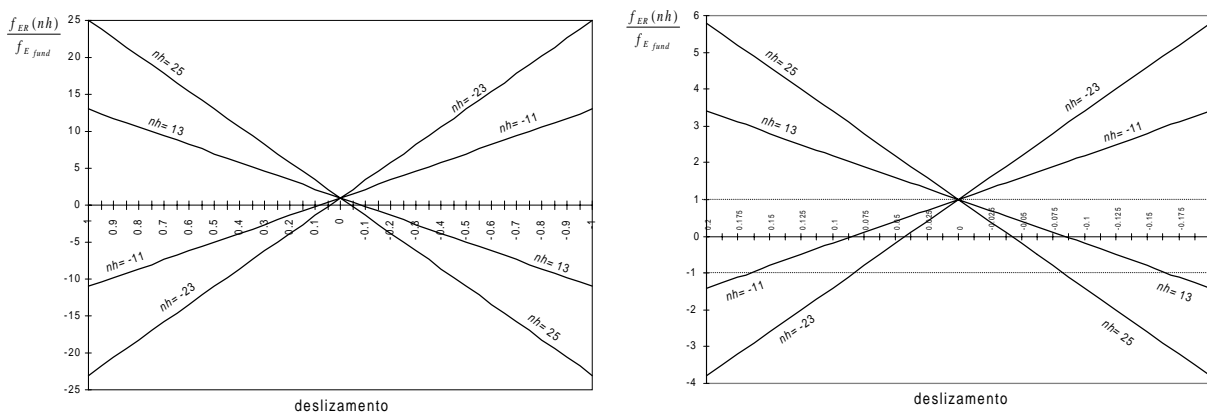


Figura 3.17 - Frequência da corrente no estator provocada pelo harmónico nh da corrente equivalente total dos dois enrolamentos do rotor.

As frequências negativas na Figura 3.17 indicam apenas que o campo girante criado pelo respectivo harmónico roda em sentido contrário ao campo girante fundamental.

A frequência dos harmónicos da corrente do estator produzidos pelos harmónico da corrente do rotor varia fortemente com a velocidade a que a máquina roda.

Com a máquina parada e a rodar ao dobro da velocidade de sincronismo (deslizamentos 1 e -1), os harmónicos do estator têm a mesma frequência que os do rotor que lhes deram origem.

Para cada harmónico existe uma velocidade de rotação da máquina onde a frequência do harmónico é nula (o harmónico transforma-se numa componente contínua) e duas velocidades¹ onde a frequência é igual à da fundamental.

4 Indutância de alisamento

Para obter o valor da indutância de alisamento (L_{alisa}) desprezam-se os efeitos do *ripple* da tensão gerada pelos rectificadores ($V_{dc}(t)$). Este *ripple* (3.4% de $\overline{V_{dc}(t)}$) é desprezável face às

¹ Uma delas é a de sincronismo (deslizamento nulo), mas neste caso não faz sentido falar de harmónicos porque a corrente no rotor a esta velocidade é nula.

variações de tensão existentes na tensão gerada pelo conversor DC/AC ($E_{dc}(t)$). Deste modo considera-se que $V_{dc}(t)$ é constante.

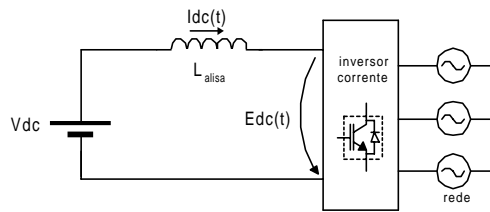


Figura 3.18 - Esquema usado para obter o valor da indutância de alisamento

Desprezando o efeito do filtro de corrente do conversor DC/AC e considerando que a rede tem uma impedância nula, a tensão $E_{dc}(t)$ depende apenas do índice de modulação e da fase¹.

O seu valor médio é dado por:

$$\overline{E_{dc}} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot im \cdot \cos(\theta) \cdot V_c \quad (3.32)$$

onde V_c é a tensão eficaz composta da rede, im é o índice de modulação e θ é o esfasamento entre a corrente de saída do conversor e a tensão da rede.

A forma de onda típica de $E_{dc}(t)$ é mostrada na Figura 3.19 onde se verifica que se repete a cada $\frac{1}{6}$ de período.

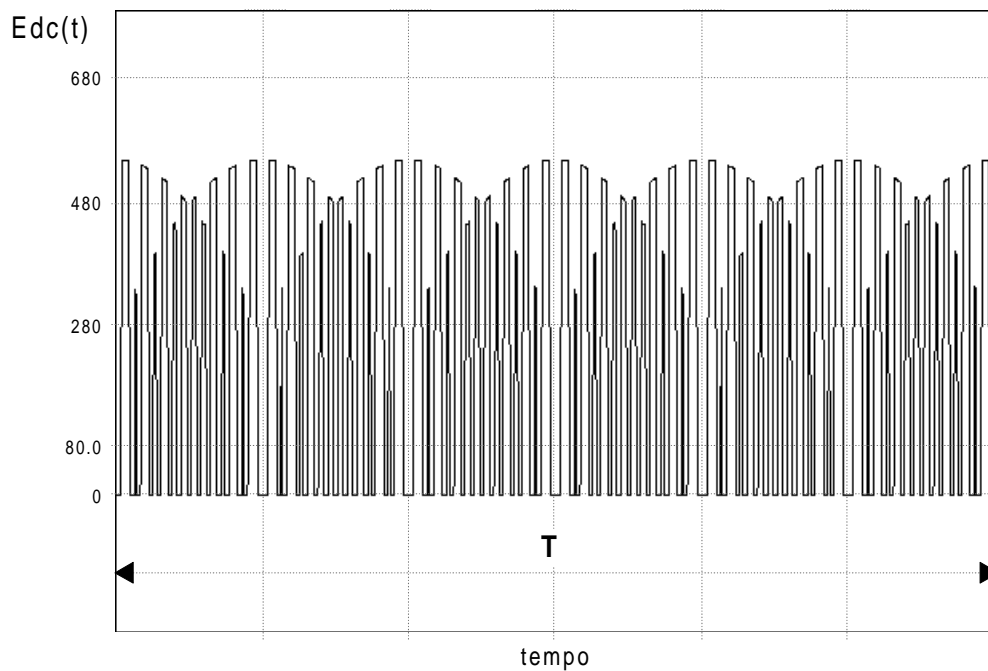


Figura 3.19 - Forma de onda típica da tensão gerada pelo conversor DC/AC à sua entrada. ($im=0.5$ e $\theta=0^\circ$).

¹ O funcionamento do conversor DC/AC, controlo e características são descritos no capítulo 4.

A corrente $I_{dc}(t)$ é dada por:

$$I_{dc}(t) = \frac{1}{L_{alisa}} \cdot \int_0^t (V_{dc} - E_{dc}(t)) dt \quad (3.33)$$

Para que o seu valor médio $\overline{I_{dc}(t)}$ se mantenha constante, é necessário que o valor médio de $E_{dc}(t)$ seja igual a V_{dc} :

$$\overline{E_{dc}(t)} = V_{dc} \Rightarrow \overline{I_{dc}(t)} = \text{constante}$$

Naturalmente tal como $E_{dc}(t)$, $I_{dc}(t)$ vai-se repetir a cada $\frac{1}{6}$ de período com uma ondulação em torno do seu valor médio:

$$I_{dc}(t) = \frac{1}{L_{alisa}} \cdot \int_0^{t - \frac{T}{6} \cdot k} (V_{dc} - E_{dc}(t)) dt + \overline{I_{dc}(t)} \quad (3.34)$$

A ondulação de $I_{dc}(t)$ depende do valor da indutância de alisamento e do integral da diferença de tensões entre V_{dc} e $E_{dc}(t)$.

As figuras seguintes mostram $E_{dc}(t)$, o seu valor médio (igual a V_{dc}) e o integral da diferença entre $E_{dc}(t)$ e V_{dc} . Naturalmente a corrente $I_{dc}(t)$ tem em torno do seu valor médio, uma forma de onda igual ao integral (a menos do ganho/atenuação introduzido pela indutância de alisamento).

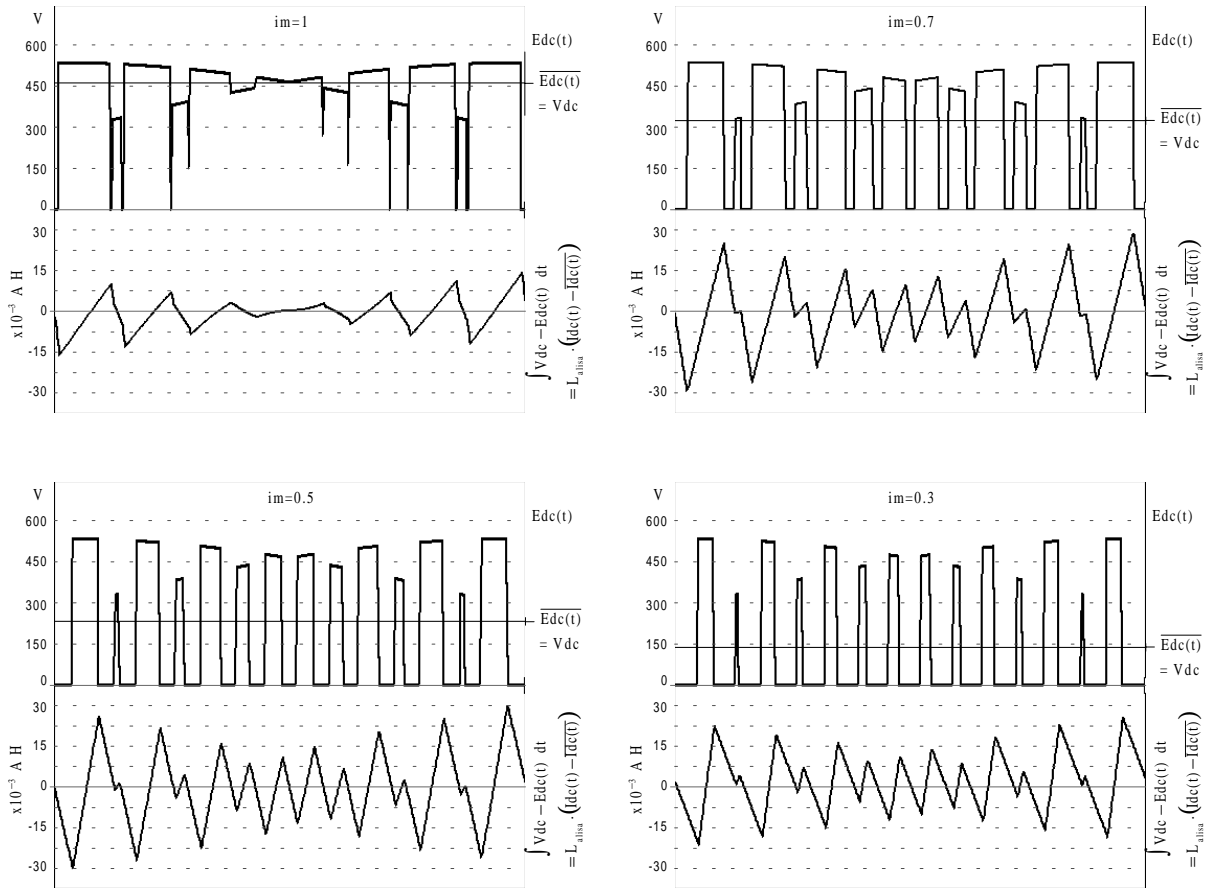


Figura 3.20 - Formas de onda de $E_{dc}(t)$ e $\int (E_{dc}(t) - V_{dc}) dt$.

O valor Δy representa o valor de pico a pico (max - min) do integral da diferença entre $E_{dc}(t)$ e V_{dc} .

Desta forma a máxima variação da corrente $I_{dc}(t)$ (ΔI_{dc}) (valor de pico a pico) é dada por:

$$\Delta I_{dc} = \frac{\Delta y}{L_{alisa}} \quad (3.35)$$

O andamento do valor de Δy em função do índice de modulação é mostrado na Figura 3.21 e pode ser aproximado por:

$$\Delta y(im) = 62 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 0.4259 \cdot im) \quad \times 10^{-3} \text{ AH} \quad (3.36)$$

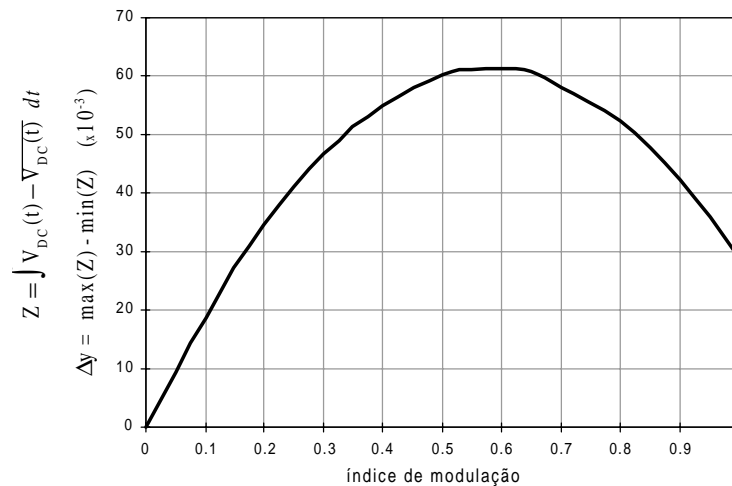


Figura 3.21 - Andamento do valor de pico a pico (Δy) de $\int (E_{dc}(t) - V_{dc}) dt$ em função do índice de modulação.

O seu valor máximo é atingido com im entre 0,5 e 0,6 e vale aproximadamente 60mAH.

Isto significa que a máxima ondulação da corrente $I_{dc}(t)$ é atingida para im entre 0,5 e 0,6 e vale:

$$\Delta I_{dc_{max}} = \frac{60^{E-3}}{L_{alisa}} \text{ A} \tag{3.37}$$

Impondo uma ondulação máxima de 60A, obtêm-se uma indutância de 1mH.

Se em vez de se considerar a unidade “ $\times 10^{-3}$ AH” na Figura 3.21 se considerar a unidade “A”, a figura passa a indicar o andamento de ΔI_{dc} em função do im para a indutância utilizada.

5 Conclusões

Este capítulo analisou os requisitos do conversor AC/DC para o SRED.

Desta análise resultou o projecto da topologia do conversor e dos componentes a incluir na implementação final. A análise e dimensionamento foram efectuados com recurso às ferramentas Matlab, MapleV e Spice.

O conversor implementado é constituído pelo paralelo de duas montagens com díodos (S3 e PD3), ligadas através de uma bobina de interfases para limitar a corrente de circulação.

A corrente fornecida pelo conversor é filtrada com recurso a uma bobine em série na saída.