

Nesta situação, há dois fatores importantes na análise do retificador:

$$\text{Fator de deslocamento} \quad FD = \cos(\phi)$$

Fator Harmônico da corrente de entrada

$$FH = \sqrt{\frac{I_s^2 - I_{s1}^2}{I_{s1}^2}} = \sqrt{\left(\frac{I_s}{I_{s1}}\right)^2 - 1}$$

I_s Valor eficaz (RMS) da corrente de entrada.
 I_{s1} Valor eficaz (RMS) da componente fundamental (1ª harmônica) da corrente de entrada I_s .

E o **fator de potência de entrada** ("visto" pela fonte para o conjunto retificador + carga), pode ser calculado de um modo alternativo:

$$FP = \frac{\text{Potência ativa (útil, W) na carga}}{\text{Potência aparente (VA) na carga}} = \frac{\frac{V_s I_{s1} \cos(\phi)}{2}}{\frac{V_s I_s}{2}} = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos(\phi) = \frac{I_{s1}}{I_s} FD$$

Fator de potência de entrada

Observações:

- O **Fator Harmônico (FH)** é uma medida da distorção de uma forma de onda. Ele também é chamado de **Distorção Harmônica Total (THD, Total Harmonic Distortion)**.
- Se a corrente de entrada i_s for puramente senoidal, então:
 - $I_{s1} = I_s$ e o Fator de Potência (FP) é igual ao Fator de Deslocamento (FD).
 - O ângulo de deslocamento ϕ torna-se igual ao ângulo da impedância θ .
 - O Fator Harmônico é nulo ($FH = 0$), pois não há distorção da corrente.
- O Fator de Deslocamento é também conhecido como **Fator de Potência de Deslocamento (FPD)**.
- Um retificador ideal deve ter $FH = THD = 0$ e $FP = FD = 1$.

Exercícios relacionados a este tema:

2ª Lista de Exercícios (disponível no Portal AVA)

ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Tema 5 – Transistores de potência

Prof. Solivan Valente
solivan@up.edu.br

Introdução

Os transistores de potência têm as características de entrada em condução (ON) e de desligamento (OFF) controladas.

Quando "ligados" (em condução), eles operam em uma região com baixa queda de tensão para se aproximarem de uma chave de potência ideal.

Os transistores atuais possuem uma velocidade de chaveamento muito maior que a dos tiristores, e são amplamente utilizados em conversores CC-CC e CC-CA, com diodos ligados em antiparalelo para proporcionar fluxo de corrente bidirecional.

Por outro lado, os transistores de potência operam com tensões e correntes menores que as dos tiristores, e por isso são normalmente usados em aplicações de baixa e de média potência.

Introdução

Os transistores (de potência ou não), estão disponíveis em diversos formatos e encapsulamentos:



Fonte da imagem:
CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=32055>

Para conhecer um pouco mais sobre os padrões de identificação dos transistores, veja: https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor#Device_identification

Introdução

De um modo geral, os transistores de potência podem ser classificados nas seguintes categorias:

1. **MOSFET** – Transistor de Efeito de Campo de Óxido Metálico Semicondutor (Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor)
2. **JFET** – Transistor de Efeito de Campo de Junção (Junction-Gate Field-Effect Transistor)
3. **BJT** – Transistor de Junção Bipolar (Bipolar Junction Transistor)
4. **IGBT** – Transistor Bipolar de Porta Isolada (Insulated-Gate Bipolar Transistor)
5. **SIT** – Transistor de Indução Estática (Static Induction Transistor)

Podemos considerar todos eles como chaves ideais para facilitar a compreensão das técnicas de conversão de energia (como fazemos com os diodos).

Porém, as características e especificações dos dispositivos reais devem ser avaliadas para a escolha do tipo adequado para cada aplicação.

Introdução

Símbolos

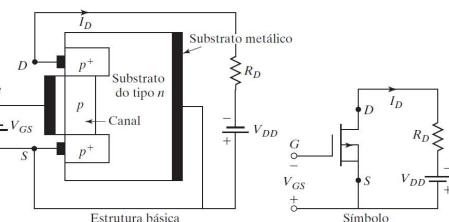
A tabela abaixo mostra os principais símbolos usados na análise de circuitos com transistores de potência e os seus significados:

Símbolo	Significado
i_v	Corrente e tensão instantâneas, respectivamente
$I; V$	Corrente e tensão CC, respectivamente
$I_G; I_D; I_S; I_{DS}$	Correntes de porta, de dreno, de fonte e saturação de MOSFETs, respectivamente
$I_B; I_C; I_{CE}$	Correntes de base, de coletor, de emissor e saturada de BJTs, respectivamente
$V_{GS}; V_{DS}$	Tensões porta-fonte e dreno-fonte de MOSFETs, respectivamente
$V_{BE}; V_{CE}$	Tensões base-emissor e coletor-emissor de BJTs, respectivamente
$I_{CE}; V_{GS}; V_{CE}$	Corrente de coletor, tensões porta-fonte e coletor-emissor de IGBTs, respectivamente
$T_A; T_C; T_p; T_S$	Temperatura ambiente, de encapsulamento, da junção e do dissipador, respectivamente
$t_{pd}; t_{as}; t_s; t_{tr}; t_{tf}$	Tempos de atraso, de subida, de condução, de armazenamento, de descida e desligado de um transistor de chaveamento, respectivamente
$\beta_F (= h_{FE}); \alpha_F$	Ganho de corrente direta e razão de correntes coletor-emissor de BJTs, respectivamente
$R_C; R_D; R_G$	Resistência de coletor, de dreno e de porta, respectivamente

Fonte:
RASHID, M. H. Eletrônica de potência: dispositivos, circuitos e aplicações. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2014.

MOSFET de Potência

MOSFET tipo depleção de canal n



É formado sobre um substrato de silício do tipo p, com duas seções de silício fortemente dopadas n+ para conexões de baixa resistência. A porta (G) é isolada do canal por uma fina camada de óxido, e o substrato normalmente é conectado à fonte (S). A tensão V_{GS} pode ser positiva ou negativa:

- $V_{GS} < 0$ Ocorre estreitamento do canal e aumento da resistência R_{DS} entre dreno (D) e fonte (S). Se V_{GS} for suficientemente negativa, o canal se fecha, R_{DS} tem valor elevado e não há corrente do dreno (D) para a fonte (S), $I_D = 0$. O valor de V_{GS} quando isso ocorre é chamado de tensão de pinçamento (pinch-off voltage), V_P .
- $V_{GS} > 0$ O canal fica mais largo, e a corrente I_D aumenta com a redução de R_{DS} .

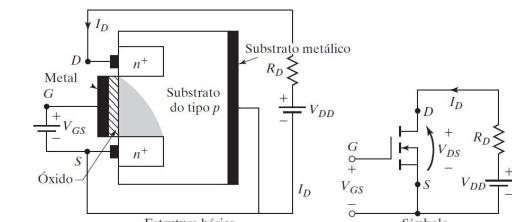
A construção é semelhante à do MOSFET tipo depleção de canal n, mas os tipos de substratos são invertidos (tipo p para tipo n, e vice-versa).

Por isso, a operação é semelhante, mas as polaridades das tensões V_{DD} e V_{GS} são invertidas, e o sentido da corrente I_D é invertido.

Note também a inversão da seta no símbolo do dispositivo.

MOSFET de Potência

MOSFET tipo intensificação de canal n



Ao contrário do tipo depleção, o MOSFET tipo intensificação não possui canal físico.

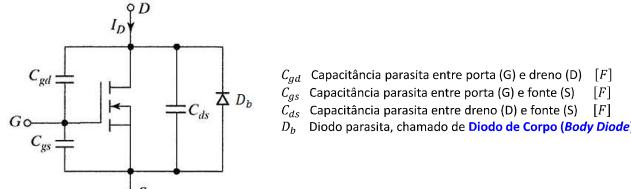
- $V_{GS} < 0$ Não há corrente do dreno (D) para a fonte (S), $I_D = 0$.
- $V_{GS} > 0$ Se V_{GS} for igual ou superior à tensão de limiar (threshold voltage), V_T , forma-se um canal virtual (área em cinza na figura), e haverá corrente I_D do dreno (D) para a fonte (S).

MOSFET de Potência

Características de chaveamento

Devido às características construtivas do MOSFET do tipo intensificação, podemos representá-lo pelo circuito equivalente abaixo:

Há capacitâncias parasitas entre os terminais, e um "diodo embutido" D_b com velocidade de chaveamento muito menor que a do MOSFET em si. Quando o transistor cheaveia cargas indutivas, esse diodo funciona como um diodo de roda livre, e ocorre um fluxo indesejado de corrente reversa internamente ao MOSFET, da fonte (S) para o dreno (D).



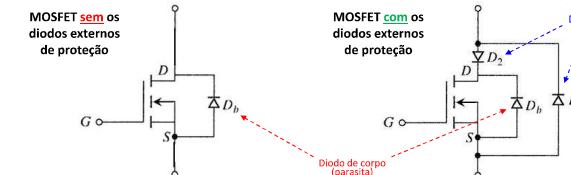
C_{gd} Capacitância parasita entre porta (G) e dreno (D) [F]
 C_{gs} Capacitância parasita entre porta (G) e fonte (S) [F]
 C_{ds} Capacitância parasita entre dreno (D) e fonte (S) [F]
 D_b Díodo parasita, chamado de **Díodo de Corpo (Body Diode)**

MOSFET de Potência

Se for permitida a condução pelo diodo de corpo D_b , poderá ocorrer uma corrente de pico elevada durante a transição de desligamento do diodo. A maioria dos MOSFETs não é preparada para lidar com essas correntes e, por isso, podem ocorrer panes no transistor.

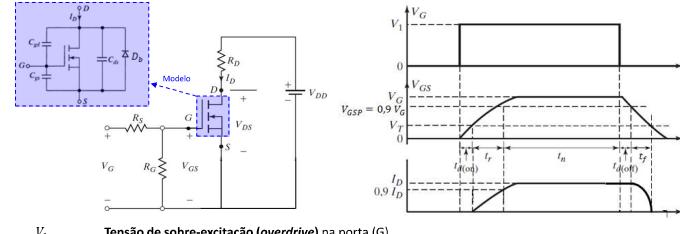
Para evitar essa situação, podem ser adicionados **diodos externos de proteção**:

- O diodo em antiparalelo D_1 funciona como um **díodo de roda livre**, para proteger o MOSFET durante o cheaveamento de cargas indutivas (como caminho alternativo para a corrente, para não passar pelo diodo interno D_b).
- O diodo em série D_2 bloqueia a corrente reversa que pode ocorrer por causa do diodo interno D_b .



MOSFET de Potência

Comportamento típico de um MOSFET durante o cheaveamento



Tensão de sobre-excitação (overdrive) na porta (G).
Atraso na entrada em condução: tempo necessário para carregar a capacidade de entrada C_{gs} até o nível da tensão de limiar V_T .
Tempo de subida (rise time): tempo de carga da porta, do nível de limiar V_T até a tensão total da porta, V_{GS} , necessária para ativar o transistão na região linear.
Atraso no bloqueio: tempo exigido para a capacidade de entrada C_{gs} descarregar a partir da tensão de sobre-excitação (overdrive) da porta, V_1 , até a região de pinçamento. A tensão V_{GS} deve diminuir significativamente antes de V_{DS} começar a subir.
Tempo de descida (fall time): tempo necessário para que a capacidade de entrada descarregue a partir da região de pinçamento ate a tensão de limiar, V_T . Quando $V_{GS} \leq V_T$ o transistão desliga.

JFET – Transistor de Efeito de Campo de Junção

O JFET é um transistor de construção simples, que também possui 3 terminais:

- Porta ou **Gate** (G)
- Dreno ou **Drain** (D)
- Fonte ou **Source** (S)

Possui um **canal que conecta a fonte (S) e o dreno (D)**, e a porta (G) é usada para controlar o fluxo de corrente através do canal.

O JFET normalmente está ligado quando a tensão é nula entre porta e fonte ($V_{GS} = 0$). Se uma tensão V_{GS} com polaridade adequada é aplicada, o **JFET aumenta de modo proporcional a resistência (R_{DS}) ao fluxo de corrente, de modo que fluirá menos corrente (I_D) no canal**. Quando V_{GS} ultrapassa certo valor (V_p), a corrente no canal será nula ($I_D = 0$) e dizemos que o canal foi "pinçado" (o JFET estará **desligado**).

Há 2 tipos básicos de JFETs:

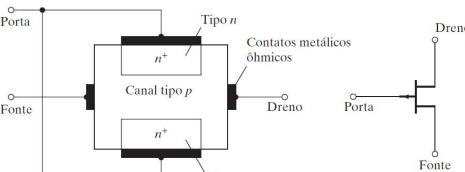
- JFET de canal n
- JFET de canal p



JFET Canal n
Motorola BFR30LT1

JFET – Transistor de Efeito de Campo de Junção

JFET de canal p



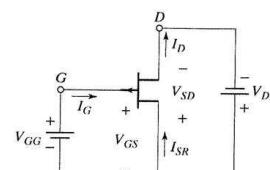
A construção é semelhante à do JFET de canal n, mas os **tipos de substratos são invertidos** (tipo p para tipo n, e vice-versa).

No símbolo do dispositivo, a seta está **invertida** em relação ao JFET de canal n, mas **também aponta de uma região do tipo p para uma região do tipo n**.

Fonte:
RASHID, M. H. Eletrônica de potência: dispositivos, circuitos e aplicações. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2014.

JFET – Transistor de Efeito de Campo de Junção

JFET de canal p



A polarização é **invertida** em relação ao JFET de canal n. Ou seja, o dreno (D) é mantido em **potencial negativo** e a porta (G) em **potencial positivo** em relação à fonte (S).

A corrente de porta I_G **entra na porta**, e é da ordem de nanoampères ($10^{-9} A$).

A corrente de dreno I_D é causada por **lacunas** (portadores majoritários), e flui da **fonte (S)** para o **dreno (D)**.

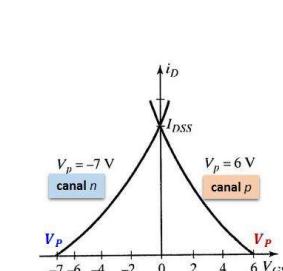
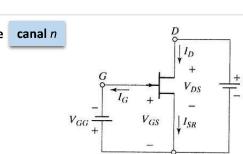
Fonte:
RASHID, M. H. Eletrônica de potência: dispositivos, circuitos e aplicações. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2014.

Fonte:
RASHID, M. H. Eletrônica de potência: dispositivos, circuitos e aplicações. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2014.

JFET – Transistor de Efeito de Campo de Junção

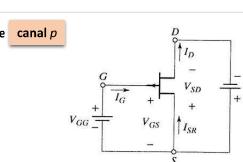
Características de transferência dos JFETs

JFET de canal n



$|V_p|$ Tensão de pinçamento (pinch-off voltage) [V]

JFET de canal p



$|V_p|$ Tensão de pinçamento (pinch-off voltage) [V]

Tipos de tiristores e comparação entre eles

Tipo de chave	Controle de porta	Característica do controle	Frequência de chaveamento	Queda de tensão no estado ligado	Faixa máxima de tensão	Faixa máxima de corrente	Vantagens	Limitações
SCRs controlados por fosc	Corrente para ligar Sem controle de desligamento	Liga com um sinal de pulso Desliga com comutação natural	Baixa – 60 Hz	Baixa	1,5 kV, 0,1 MVA	1 kA, 0,1 MVA	Acionamento simples. Dispositivo de retenção. Geralmente acionamento à maioria. Dispositivo de baixo custo, alta tensão e alta corrente.	Baixa velocidade de chaveamento. Mais adequados para aplicações entre 50 e 60 Hz. Têm uma porta para acionamento em ambas as sentenças. Atua como dois SCRs conectados back-to-back.
Tiristores bidirecionais	Dúas portas: Corrente para ligar Sem controle de desligamento	Liga com um sinal de pulso Desliga com comutação natural	Baixa – 60 Hz	Baixa	6,5 kV a 1,8 kA, 0,1 MVA	3 kA a 1,8 kV, 0,1 MVA	O mesmo que em SCRs controlados por fosc, exceto que tem duas portas e a corrente pode fluir em ambos os sentidos. Combina dois SCRs back-to-back em um único dispositivo.	Semelhantes às dos SCRs controlados por fase.
Tiristores ativados por luz (LASCRs)	Sinal de luz para ligar Sem controle de desligamento	Liga com um sinal de pulso Desliga com comutação natural	Baixa – 60 Hz	Baixa			O mesmo que em SCRs controlados por fosc, exceto que a porta é isolada e pode ser operada a distância.	Semelhantes às dos SCRs controlados por fase.

Fonte:
RASHID, M. H. Eletrônica de potência: dispositivos, circuitos e aplicações. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2014.

Tipos de tiristores e comparação entre eles

Tipo de chave	Controle de porta	Característica do controle	Frequência de chaveamento	Queda de tensão no estado ligado	Faixa máxima de tensão	Faixa máxima de corrente	Vantagens	Limitações
TRIAC	Corrente para ligar Sem controle de desligamento	Liga pela aplicação de um sinal de pulso na porta com fluxo de corrente em ambos os sentidos. Desliga com comutação natural.	Baixa – 60 Hz	Baixa			O mesmo que em SCRs controlados por fase, exceto que a corrente pode fluir em ambos os sentidos. Têm uma porta para acionamento em ambas as sentenças. Atua como dois SCRs conectados back-to-back.	Semelhantes às dos SCRs controlados por fase, exceto pelas aplicações para baixa potência.
Tiristores de desligamento rápido	Corrente para ligar Sem controle de desligamento	Liga com um sinal de pulso. Desliga com comutação natural.	Média – 5 kHz	Baixa			O mesmo que em SCRs controlados por fosc, exceto que o desligamento é mais rápido. Mais adequados para conversores de corrente alternada com aplicações de potência média a alta.	Semelhantes às dos SCRs controlados por fase.
GTOs	Corrente para controle de acionamento e desligamento	Liga com um sinal de pulso positivo. Desliga com um pulso negativo.	Média – 5 kHz	Baixa			O ganho de desligamento é baixo, entre 5 e 8, e necessita de um grande corrente na porta para desligar uma grande corrente no estado ligado. Há uma corrente de cada lama durante o desligamento. Embora seja um dispositivo de transição, necessita de uma corrente mínima de porta para entrar no estado ligado.	Semelhantes ao GTOs, exceto que a transferência de corrente é feita a partir da porta para a região do catodo e o desligamento é mais rápido. O MOSFET em série precisa conduzir a corrente principal de anodo, e isso aumenta a queda de tensão no dispositivo, aproximadamente 0,3 a 0,5 V, além das perdas por condução.

Fonte:
RASHID, M. H. Eletrônica de potência: dispositivos, circuitos e aplicações. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2014.

Tipos de tiristores e comparação entre eles

Tipo de chave	Controle de porta	Característica do controle	Frequência de chaveamento	Queda de tensão no estado ligado	Faixa máxima de tensão	Faixa máxima de corrente	Vantagens	Limitações
MCTs	Dúas portas: controlam o acionamento e o desligamento	Ligados pelo MCT de canal p com uma tensão negativa em relação ao anodo e desligados com tensão positiva.	Média – 5 kHz	Média			Reúne as vantagens dos GTOs e da porta MOSFET em um único dispositivo. A potência/margem necessária para ligar e desligar é menor, e o tempo de atraso ao comando é menor. Comutação com baixas pendentes de comutação e no estado ligado, e de velocidade de chaveamento rápida para aplicações em conversores de alta potência.	Têm potencial para ser tiristores praticamente definitivos em termos de tempo de atraso ao comando com um sinal de porta negativo.
SITHs	Uma porta: controlam o acionamento e o desligamento	Ligados pela aplicação de uma tensão de comando positiva na porta e desligados com uma tensão negativa na porta.	Alta – 100 kHz	Baixa – 1,5 V a 300 A, 2,6 V a 900 A	2500 V		Dispositivos controlados pelo campo e necessitam de uma tensão constante de porta. São extremamente sensíveis ao processo e pequenas perturbações no processo de fabricação podem produzir grandes alterações nas características deles.	Dispositivos controlados pelo campo e necessitam de uma tensão constante de porta. São extremamente sensíveis ao processo e pequenas perturbações no processo de fabricação podem produzir grandes alterações nas características deles.

Fonte:
RASHID, M. H. Eletrônica de potência: dispositivos, circuitos e aplicações. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2014.

Tipos de tiristores e comparação entre eles

Tipo de chave	Controle de porta	Característica do controle	Frequência de chaveamento	Queda de tensão no estado ligado	Faixa máxima de tensão	Faixa máxima de corrente	Vantagens	Limitações
MTOs	Dúas portas: controla o acionamento e o desligamento	Corrente para ligar Pulso de corrente ligeira e sinal de tensão para desligar	Média – 5 kHz	Baixa	10 kV a 20 MVA, 4,5 kV a 500 A	4 kA a 20 MVA	Semelhantes aos GTOs, com uma corrente de cauda ligeiramente maior e desligamento.	Semelhantes aos GTOs, com uma corrente de cauda ligeiramente maior e desligamento.
ETOIs	Dúas portas: controla o acionamento e o desligamento	Corrente para ligar Pulso de corrente ligeira e sinal de tensão para desligar	Média – 5 kHz	Média			Precisa de uma tensão de cauda maior para a transferência de corrente para a região do catodo e o desligamento.	Precisa de uma tensão de cauda maior para a transferência de corrente para a região do catodo e o desligamento.
IGCTs	Dúas portas: controla o acionamento e o desligamento	Corrente para ligar Pulso de corrente hard	Média – 5 kHz	Baixa	5 kV a 400 A		Atuam como um GTO de chaveamento hard. Desligamento muito rápido. Devido à aplicação de uma grande corrente de porta para desligar, o tempo de desligamento também é rápido. Necessitam de baixa tensão de porta para desligar.	Semelhantes a outros dispositivos GTO, a iniciação do processo de comando de porta e do catodo deve ter um valor muito baixo. Podem ter um diodo interno em antiparalelo.

Fonte:
RASHID, M. H. Eletrônica de potência: dispositivos, circuitos e aplicações. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2014.

Exercícios complementares

Exercícios relacionados a este tema:

4ª Lista de Exercícios (disponível no Portal AVA)

2ª Lista de Exercícios

Retificadores com diodos de potência

1. (QR4) Quais são os parâmetros de desempenho de um retificador?

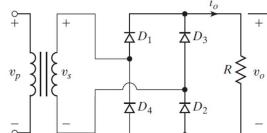
2. (QR6) Qual é a relevância do fator de ondulação de um retificador?

3. (QR9) O que é fator de deslocamento?

4. (QR10) O que é fator de potência de entrada?

5. (QR11) O que é fator harmônico?

6. (P3.1) O retificador monofásico em ponte abaixo tem uma carga puramente resistiva $R = 5 \Omega$, tensão de alimentação no primário com pico de $V_m = 170 V$ e frequência $f = 60 Hz$. Sabendo que o transformador tem razão de espiras igual a 1, determine a tensão média de saída.

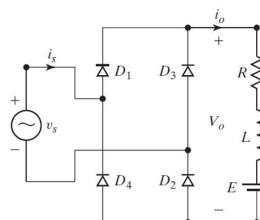


7. (P3.7) O retificador monofásico em ponte do Exercício 1 deve fornecer uma tensão média $V_{CC} = 240 V$ para uma carga resistiva $R = 10 \Omega$. Determine:

- A especificações dos diodos: $I_{D(\text{pico})}$, $I_{D(\text{méd})}$ e PIV.
- As especificações do transformador de entrada: V_s , I_s , FUT e porcentagem de superdimensionamento.

8. (P3.13) O retificador monofásico de onda completa abaixo tem $L = 4,5 mH$, $R = 4 \Omega$ e $E = 20 V$. A tensão de entrada é $V_s = 120 V$ em $60 Hz$. Determine:

- Se a corrente de carga i_o é contínua ou descontínua.
- O valor da corrente de carga em regime permanente I_o .
- A corrente média em cada diodo $I_{D(\text{méd})}$.
- A corrente eficaz (RMS) em cada diodo $I_{D(\text{rms})}$.
- A corrente eficaz (RMS) de saída $I_{o(\text{rms})}$.



RESOLUÇÃO:

1. (QR4)

- Eficiência ou Razão de Retificação (η)
- Fator de Forma (FF)
- Fator de Ondulação ou Fator de Ripple (FR)
- Fator de Utilização do Transformador (FUT)
- Fator de potência de entrada (FP)
- Fator de Crista (FC)

2. (QR6)

O Fator de Ondulação é uma medida da intensidade da ondulação da tensão de saída do retificador.

3. (QR9)

O Fator de Deslocamento (FD) é igual ao cosseno do ângulo entre as componentes fundamentais da tensão de entrada e da corrente de entrada do retificador. Quando ambas são puramente senoidais (carga linear), a FD coincide com o Fator de Potência (FP).

4. (QR10)

É o Fator de Potência (FP) que a fonte (em geral um transformador) “vê” no conjunto retificador + carga. Como esse conjunto é não linear, o FP é obtido pela multiplicação do Fator de Deslocamento (FD) pela razão I_{s1}/I_s , sendo I_s o valor eficaz (RMS) da corrente de entrada e I_{s1} o valor eficaz (RMS) da 1ª harmônica de I_s .

5. (QR11)

O Fator Harmônico (FH) é uma medida da distorção de uma forma de onda. Ele também é chamado de Distorção Harmônica Total (THD, Total Harmonic Distortion).

6. (P3.1)

Como o transformador tem razão de espiras igual a 1, a tensão v_p no primário e a tensão v_s no secundário têm o mesmo valor de pico $V_m = 170 V$. Então, o valor médio da tensão de saída é o valor médio de uma tensão senoidal retificada em onda completa:

$$V_{CC} = \frac{2}{\pi} V_m = \frac{2 \cdot 170}{\pi} \rightarrow V_{CC} \cong 108,2 V$$

7. (P3.7)

O valor de pico V_m da tensão fornecida ao retificador será:

$$V_{CC} = \frac{2}{\pi} V_m \rightarrow V_m = \frac{\pi \cdot V_{CC}}{2} = \frac{\pi \cdot 240}{2} \rightarrow V_m \cong 377 V$$

Tensão eficaz (RMS) fornecida ao retificador:

$$V_s = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \cong \frac{377}{\sqrt{2}} \rightarrow V_s \cong 266,6 V$$

A corrente média na carga será:

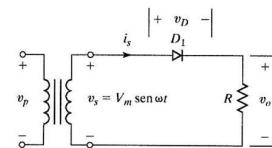
$$I_{CC} = \frac{V_{CC}}{R} = \frac{240}{10} \rightarrow I_{CC} = 24 A$$

a) Especificações dos diodos:

A corrente de pico que circula por cada diodo é a corrente de pico sobre a carga:

$$I_{D(\text{pico})} = I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{377}{10} \rightarrow I_{D(\text{pico})} = I_m \cong 37,7 A$$

9. (P3.17) O retificador monofásico de meia onda abaixo tem uma carga puramente resistiva R , e a tensão de entrada tem pico de $V_m = 100 V$. Determine:



- A eficiência do retificador.
- O Fator de Forma (FF) da tensão de saída.
- O Fator de Ondulação (FR) da tensão de saída.
- O Fator de Utilização do Transformador (FUT).
- A tensão reversa máxima do diodo (PIV).
- O Fator de Crista (FC) da corrente de entrada do retificador.
- O Fator de Potência (FP) de entrada do retificador.

A corrente média que circula por cada diodo é metade da corrente média da carga, uma vez que cada par de diodos opera apenas em meio ciclo. Então:

$$I_{D(\text{méd})} = \frac{I_{CC}}{2} = \frac{24}{2} \rightarrow I_{D(\text{méd})} \cong 12 A$$

Tensão reversa máxima aplicada em cada diodo:

$$PIV = V_m \cong 377 V$$

b) Especificações do transformador:

Tensão eficaz (RMS) na saída do transformador (secundário) – senoidal:

$$V_s = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \cong \frac{377}{\sqrt{2}} \rightarrow V_s \cong 266,6 V$$

Corrente eficaz (RMS) na saída do transformador (secundário) – senoidal:

$$I_s = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cong \frac{37,7}{\sqrt{2}} \rightarrow I_s \cong 26,66 A$$

Potência CC de saída (na carga):

$$P_{CC} = V_{CC} I_{CC} \cong 240 \cdot 24 \rightarrow P_{CC} = 5760 W$$

Fator de utilização do transformador (FUT):

$$FUT = \frac{P_{CC}}{V_s I_s} = \frac{5760}{266,6 \cdot 26,66} \rightarrow FUT \cong 0,8104$$

Porcentagem de superdimensionamento do transformador:

$$\frac{1}{FUT} \cong \frac{1}{0,8104} \rightarrow \frac{1}{FUT} \cong 1,23 \rightarrow +23\%$$

8. (P3.13)

a) Para determinar se a corrente de carga é contínua ou descontínua precisamos verificar qual é o ponto de operação do retificador no gráfico que identifica as duas regiões. Para isso, precisamos determinar o ângulo θ da carga e a razão de tensão x :

Frequência da fonte CA:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 60 = 120\pi \cong 377 rad/s$$

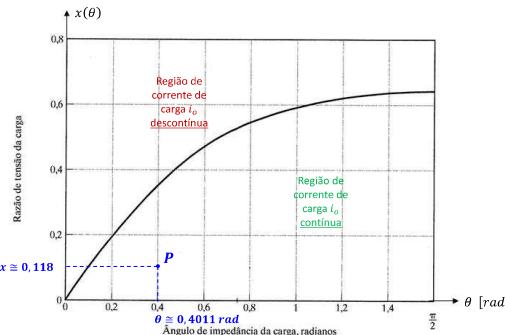
Ângulo da impedância da carga:

$$\theta = \arctg \left(\frac{\omega L}{R} \right) \cong \arctg \left(\frac{377 \cdot 4,5 \cdot 10^{-3}}{4} \right) \\ \theta \cong 0,4011 rad \cong 22,98^\circ$$

Razão do tensão:

$$x = \frac{E}{V_m} = \frac{E}{\sqrt{2} V_s} = \frac{20}{\sqrt{2} \cdot 120} \rightarrow x \cong 0,118$$

Com essas coordenadas, o ponto P de operação do retificador mostra que a corrente de carga é contínua.



b) Como sabemos que a corrente de carga é contínua, a corrente em regime permanente I_o é dada por:

$$I_o = \frac{\sqrt{2} V_s}{Z} \operatorname{sen}(\theta) \frac{1 + e^{-(R/L)(\pi/\omega)}}{1 - e^{-(R/L)(\pi/\omega)}} - \frac{E}{R}$$

Módulo da impedância da carga:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \cong \sqrt{4^2 + (377.0.0045)^2} \cong 4.34 \Omega$$

Então, temos (deixe sua calculadora em radianos):

$$I_o = \frac{\sqrt{2} \cdot 120}{4.34} \operatorname{sen}(0.4011) \frac{1 + e^{-(4/0.0045)(\pi/377)}}{1 - e^{-(4/0.0045)(\pi/377)}} - \frac{20}{4} \rightarrow I_o \cong 10,27 A$$

c) A corrente média em cada diodo $I_{D(\text{méd})}$ é obtida a partir da expressão da corrente instantânea i_o sobre a carga (deixe sua calculadora em radianos):

$$i_o = \frac{\sqrt{2} V_s}{Z} \left[\operatorname{sen}(\omega t - \theta) + \frac{2}{1 - e^{-(R/L)(\pi/\omega)}} \operatorname{sen}(\theta) e^{-(R/L)t} \right] - \frac{E}{R}$$

$$i_o = \frac{\sqrt{2} \cdot 120}{4.34} \left[\operatorname{sen}(\omega t - 0.4011) + \frac{2}{1 - e^{-(4/0.0045)(\pi/377)}} \operatorname{sen}(0.4011) e^{-(4/0.0045)t} \right] - \frac{20}{4}$$

$$i_o = 39,10 [\operatorname{sen}(\omega t - 0.4011) + 0,7813 \cdot e^{-888.88t}] - 5$$

$$i_o = 39,10 \cdot \operatorname{sen}(\omega t - 0.4011) + 30,55 \cdot e^{-888.88t} - 5 \text{ A}$$

A corrente $I_{D(\text{méd})}$ é dada por:

$$I_{D(\text{méd})} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i_o d(\omega t) \cong \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi [39,10 \cdot \operatorname{sen}(\omega t - 0.4011) + 30,55 \cdot e^{-888.88t} - 5] d(\omega t)$$

Utilizando uma ferramenta computacional (ex. Desmos), obtemos: $I_{D(\text{méd})} \cong 11 A$

d) A corrente eficaz (RMS) em cada diodo $I_{D(\text{rms})}$ é obtida pela expressão:

$$I_{D(\text{rms})} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i_o^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi [39,10 \cdot \operatorname{sen}(\omega t - 0.4011) + 30,55 \cdot e^{-888.88t} - 5]^2 d(\omega t)}$$

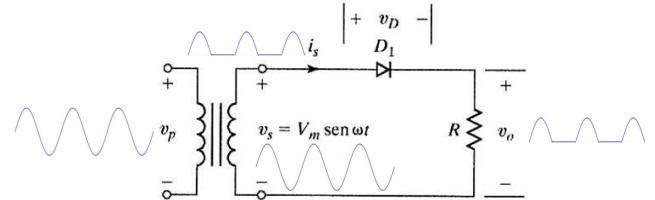
Utilizando uma ferramenta computacional (ex. Desmos), obtemos: $I_{D(\text{rms})} \cong 17,04 A$

e) A corrente eficaz (RMS) de saída $I_{o(\text{rms})}$ é:

$$I_{o(\text{rms})} = \sqrt{2} I_{D(\text{rms})} \cong \sqrt{2} \cdot 17,04 \rightarrow I_{o(\text{rms})} \cong 24,10 A$$

9. (P3.17)

Antes de iniciar os cálculos, observe com atenção as formas de onda. Elas são fundamentais para calcularmos corretamente os valores médios e eficazes (RMS) em cada caso.



Valor médio da tensão na carga (retificada em meia onda):

$$V_{CC} \cong 0,318 \cdot V_m$$

Valor médio da corrente na carga (retificada em meia onda):

$$I_{CC} \cong 0,318 \cdot I_m = \frac{0,318 \cdot V_m}{R}$$

Potência CC na carga:

$$P_{CC} = V_{CC} I_{CC} = \frac{(0,318 \cdot V_m)^2}{R}$$

Valor eficaz (RMS) da tensão na carga (retificada em meia onda):

$$V_{rms} = 0,5 \cdot V_m$$

Valor eficaz (RMS) da corrente na carga (retificada em meia onda):

$$I_{rms} = 0,5 \cdot I_m = \frac{0,5 \cdot V_m}{R}$$

Potência CA na carga:

$$P_{CA} = V_{rms} I_{rms} = \frac{(0,5 \cdot V_m)^2}{R}$$

Com essas informações, podemos calcular os parâmetros do retificador:

a) Eficiência do retificador:

$$\eta = \frac{P_{CC}}{P_{CA}} = \frac{(0,318 \cdot V_m)^2}{R} \frac{R}{(0,5 \cdot V_m)^2} \cong \frac{0,318^2}{0,5^2} \rightarrow \eta \cong 0,404 = 40,4 \%$$

b) Fator de Forma (FF) da tensão de saída:

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{CC}} \cong \frac{0,5 \cdot V_m}{0,318 \cdot V_m} \rightarrow FF \cong 1,57$$

c) Fator de Ondulação (FR) da tensão de saída:

$$FR = \sqrt{FF^2 - 1} \cong \sqrt{1,57^2 - 1} \rightarrow FR \cong 1,213 = 121,3\%$$

d) O Fator de Utilização do Transformador (FUT):

Tensão eficaz (RMS) no secundário do transformador (entrada do retificador) – senoidal:

$$V_s = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

Corrente eficaz (RMS) no secundário do transformador (entrada do retificador) – retificada em meia onda:

$$I_s = 0,5 \cdot I_m = \frac{0,5 \cdot V_m}{R}$$

Então:

$$V_s I_s = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \frac{0,5 \cdot V_m}{R} = \frac{V_m^2}{2\sqrt{2} R}$$

$$FUT = \frac{P_{CC}}{V_s I_s} \cong \frac{(0,318 \cdot V_m)^2}{R} \frac{2\sqrt{2} R}{V_m^2} = 2\sqrt{2} \cdot 0,318^2 \rightarrow FUT \cong 0,286 = 28,6\%$$

e) Tensão reversa máxima do diodo (PIV):

$$PIV = V_m = 100 V$$

f) O Fator de Crista (FC) da corrente de entrada do retificador (secundário do transformador) é a razão do valor de pico pelo valor eficaz (RMS) dessa corrente:

$$I_{s(pico)} = I_m = \frac{V_m}{R}$$

$$I_s = \frac{0,5 \cdot V_m}{R}$$

$$FC = \frac{I_{s(pico)}}{I_s} = \frac{V_m}{R} \frac{R}{0,5 V_m} \rightarrow FC = 2$$

g) Fator de Potência (FP) de entrada do retificador:

$$FP = \frac{P_{CA}}{V_s I_s} = \frac{(0,5 \cdot V_m)^2 2\sqrt{2} R}{R V_m^2} = 2\sqrt{2} \cdot 0,5^2 \rightarrow FP \cong 0,71$$