



e-Learning tools for Electrical Engineering

Temática – Electrónica de Potência

Capítulo – Onduladores

Secção –

## ESTRUTURA

### INTRODUÇÃO

Neste módulo, inicia-se o estudo das topologias (estruturas) dos onduladores mais utilizadas. Definem-se os dispositivos ou a associação de dispositivos semicondutores de potência adequados à realização da função de interruptores electrónicos necessários às topologias, e como é feita a comutação. Obtêm-se as relações existentes entre os estados possíveis dos interruptores e as grandezas eléctricas de saída (geralmente tensões).

Pré-requisitos: nenhum

Nível: Bases da engenharia electrotécnica ou área de especialização

Duração estimada: 15 minutos

Autor: Francis Labrique

Realização: Sophie Labrique

Versão Portuguesa: Fernando Alves da Silva.



Este projecto é financiado pela União Europeia no âmbito de uma acção Sócrates-Minerva. As informações nele contidas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores. A União Europeia declina toda a responsabilidade relativamente ao seu uso.

## 1. TOPOLOGIAS A ESTUDAR

Consideram-se apenas onduladores em ponte alimentando:

- ou uma carga monofásica
- ou uma carga trifásica equilibrada em triângulo ou em estrela com neutro isolado.

Nestes onduladores, cada terminal de acesso à carga está ligado a dois interruptores electrónicos com semicondutores. O conjunto de dispositivos semicondutores que constituem o interruptor  $K_j$  permite a ligação do terminal da carga ao terminal positivo da fonte contínua de alimentação, enquanto que  $K'_j$  permite a ligação ao borne negativo da fonte (figura 1).

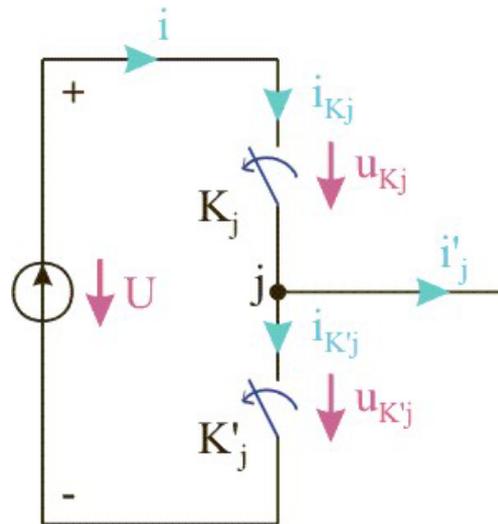


Figura 1

Os interruptores electrónicos  $K_j$  e  $K'_j$  formam um braço (ou perna) do ondulador.

- Dois braços formam um ondulador monofásico em ponte completa (figura 2)

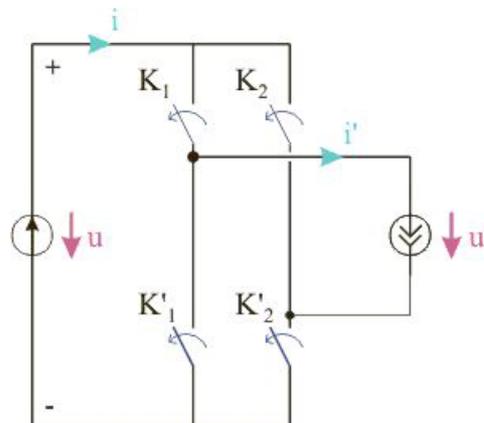


Figura 2

- Um ondulador trifásico em ponte necessita de três braços (figura 3)

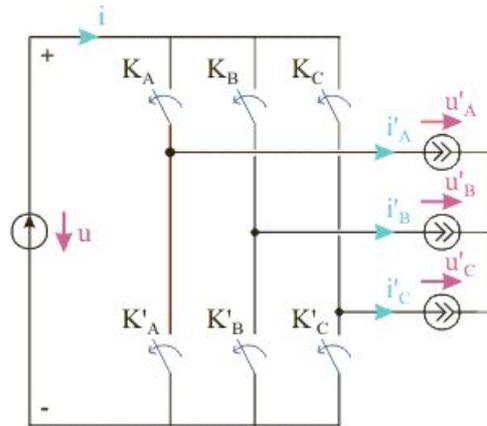


Figura 3

## 2. ESCOLHA DO TIPO DE DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES DE POTÊNCIA

Como ficou dito nas [estruturas de conversão](#), dado que o receptor se deve comportar como uma fonte de corrente e o gerador é uma fonte de tensão, tem-se em cada braço  $j$

- um dos interruptores electrónicos  $K_j$  ou  $K'_j$  deve estar no estado de CONDUÇÃO para que a corrente  $i_j$  possa circular, permitindo o carácter de fonte de corrente da carga;
- para evitar curto-circuitar a fonte  $U$ ,  $K_j$  ou  $K'_j$  não podem conduzir simultaneamente;
- admitindo que  $K_j = 1$  quando  $K_j$  CONDUZ e que  $K_j = 0$  quando  $K_j$  BLOQUEIA, e analogamente para  $K'_j$  tem-se  $K_j + K'_j = 1$  (ou seja deve conduzir um, e um só, dos interruptores electrónicos).

O estado dos dois interruptores electrónicos de cada braço, devem então ser **complementares**, ou seja, se um está em condução, o outro deverá estar ao corte (figura 4)

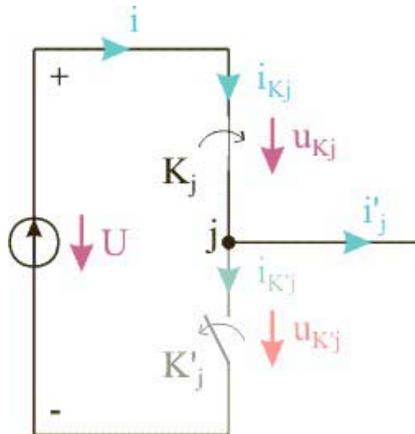


Figura 4a

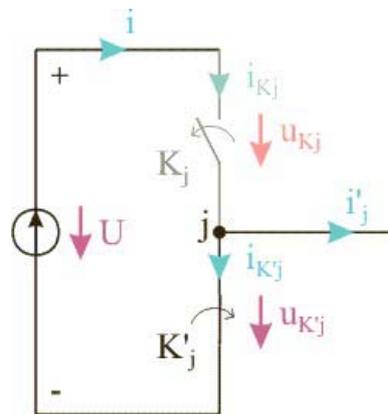


Figura 4b

Quando o interruptor  $K_j$  conduz, é atravessado pelo corrente  $i_j$ . Dado que esta corrente deve ser alternada, é positiva durante um certo intervalo de tempo e negativa durante o restante intervalo de um período. Então o interruptor electrónico  $K_j$  deve permitir a passagem do correntes positivas e negativas, ou seja deve ser REVERSÍVEL em corrente

Quando o interruptor  $K_j$  está ao CORTE, o interruptor  $K'_j$  está CONDUTOR: a tensão aos terminais de  $K_j$ ,  $U_{Kj}$ , vale  $U$ . Esta tensão é constante (contínua) e positiva.

O interruptor  $K_j$  tem de apresentar a característica tensão corrente da figura 5a, formada idealmente por 3 segmentos de recta. Os segmentos 1 e 2 podem ser contidos por características tensão corrente de transistores, enquanto os segmentos 1 e 3 podem representar a característica tensão-corrente de um díodo, tomando os simétricos das grandezas aos seus terminais. Então o interruptor electrónico poderá ser formado por um transistor, por exemplo do tipo IGBT, com um díodo montado em antiparalelo (figura 5b).

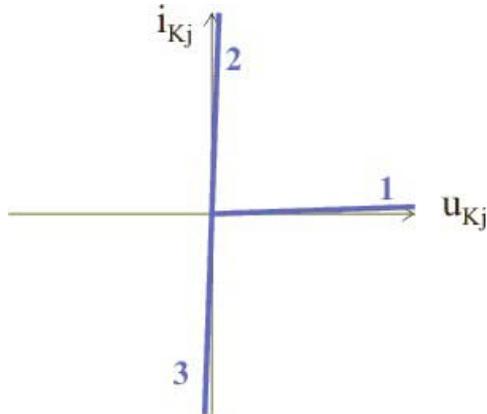


Figura 5a

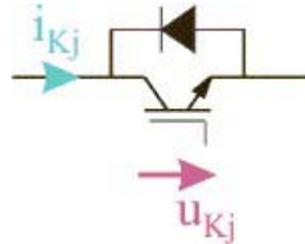


Figura 5b

- o segmento 1 corresponde aos estado BLOQUEADO do transistor IGBT e do díodo;
- o segmento 2 corresponde à CONDUÇÃO do transistor IGBT;
- o segmento 3 corresponde à CONDUÇÃO do díodo.

Quando o transistor IGBT conduz (segmento 2), o díodo é submetido a uma tensão negativa inversa muito pequena e igual à queda de tensão de condução  $(V_{CE})_{sat}$  do IGBT em condução.

Quando o díodo conduz (segmento 3), o transistor IGBT tem de suportar uma tensão inversa muito pequena, igual à queda de tensão  $V_{DON}$  interna do díodo no estado de condução. Na região de operação do segmento 3, pode comandar-se o estado do transistor IGBT, para a passagem para o segmento 2 seja automática, logo que a corrente deixar de ser negativa para ser positiva.

O interruptor  $K'_j$  tem de apresentar as mesmas características de  $K_j$ ; sendo formado por uma associação idêntica: o antiparalelo de um díodo com um transistor IGBT.

### 3. COMUTAÇÕES

Os estados dos interruptores (com dispositivos semicondutores de potência  $K_j$  e  $K'_j$  devem ser complementares (de acordo com o já observado anteriormente). Assim, para permitir a passagem da corrente eléctrica  $i_j$  sem curto-circuitar a fonte  $U$ , deve verificar-se:

- ou  $K_j$  CONDUZ e  $K'_j$  está ao CORTE
- ou  $K_j$  está ao CORTE e  $K'_j$  CONDUZ.

Para comutar  $K_j$  em CONDUÇÃO e  $K'_j$  ao CORTE para  $K_j$  ao CORTE e  $K'_j$  em CONDUÇÃO, devem ser considerados dois casos:

- a corrente  $i_j$  é positiva
- a corrente  $i_j$  é negativa

**Passagem de  $K_j$  em CONDUÇÃO e  $K'_j$  ao CORTE para  $K_j$  ao CORTE e  $K'_j$  em CONDUÇÃO para  $i_j > 0$**

Se  $i_j$  é positiva,

- quando  $K_j$  está em CONDUÇÃO é o transistor  $T_j$  que está na zona de saturação, portanto condutor (figura 6).

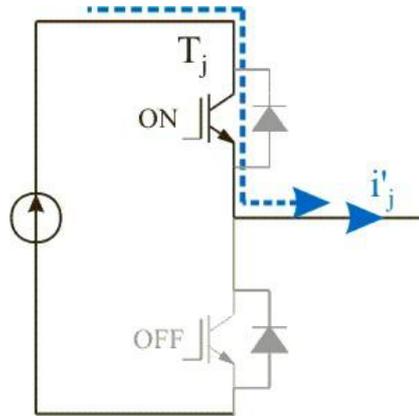


Figura 6

- quando  $K'_j$  está em CONDUÇÃO, é o diodo  $D'_j$ , polarizado directamente pela tensão na carga, que está em condução (figura 7).

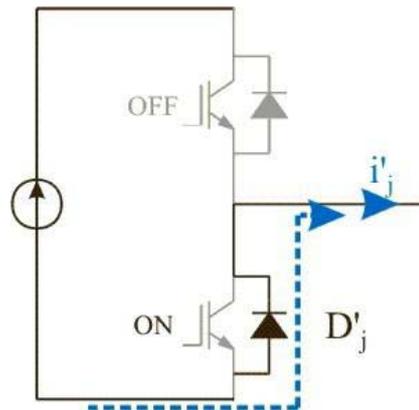


Figura 7

A comutação de  $K_j$  CONDUTOR ( $T_j$  saturado) para  $K'_j$  CONDUTOR ( $D'_j$  polarizado directamente) é feita comandando  $T_j$  para que passe ao estado de corte (figura 8).

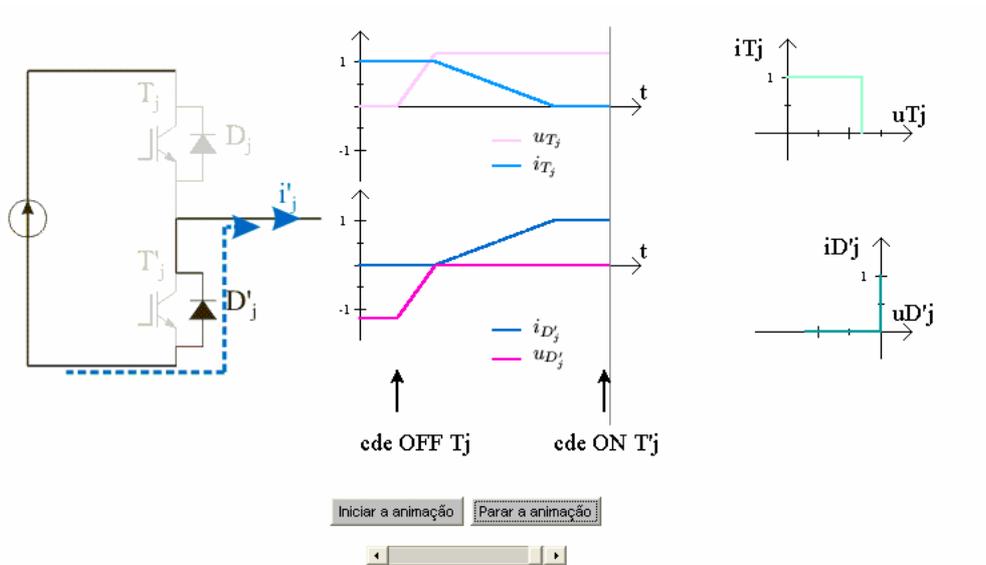


Figura 8 (animação)

Quando  $T_j$  estiver ao CORTE, pode comandar-se  $T_j$  para operar na zona de saturação, permitindo que  $K_j$  continue CONDUTOR mesmo que a corrente  $i_j$  deixe de ser positiva e passe a ser negativa.

**Passagem de  $K_j$  CONDUTOR, e  $K_j$  ao CORTE para  $K_j$  ao CORTE, e  $K_j$  CONDUTOR para  $i_j < 0$ .**

Se  $i_j$  é negativa,

- quando  $K_j$  estiver CONDUTOR é o diodo  $D_j$  que está polarizado directamente, conduzindo a corrente  $i_j$  (figura 9)

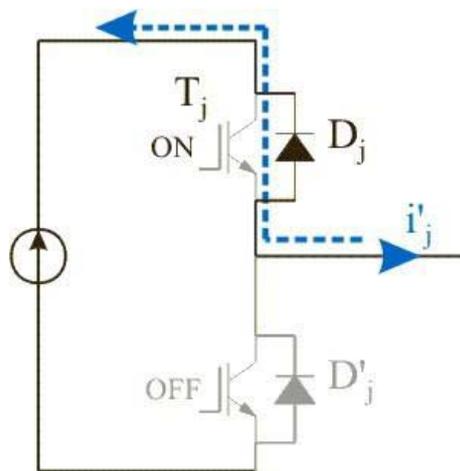


Figura 9

- quando  $K_j$  estiver CONDUTOR, então é o transistor que tem de ser comandado à saturação, sendo atravessado pela corrente  $i_j$  (figura 10).

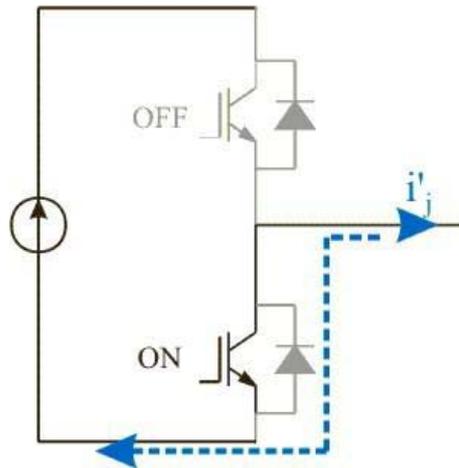


Figura 10

A comutação de  $K_j$  CONDUTOR ( $D_j$  polarizado directamente) para  $K'_j$  CONDUTOR ( $T'_j$  saturado) é feita comandando à saturação  $T'_j$ , depois (e só depois) de ter comandado previamente  $T_j$  ao corte, para evitar a condução simultânea de  $T_j$  e  $T'_j$ , o que curto-circuitaria a fonte  $U$  (figura 11), com provável destruição dos transístores (por excesso de corrente, ou por excesso de potência dissipada, devido à saída da zona de saturação), ou mesmo destruição da própria fonte  $U$

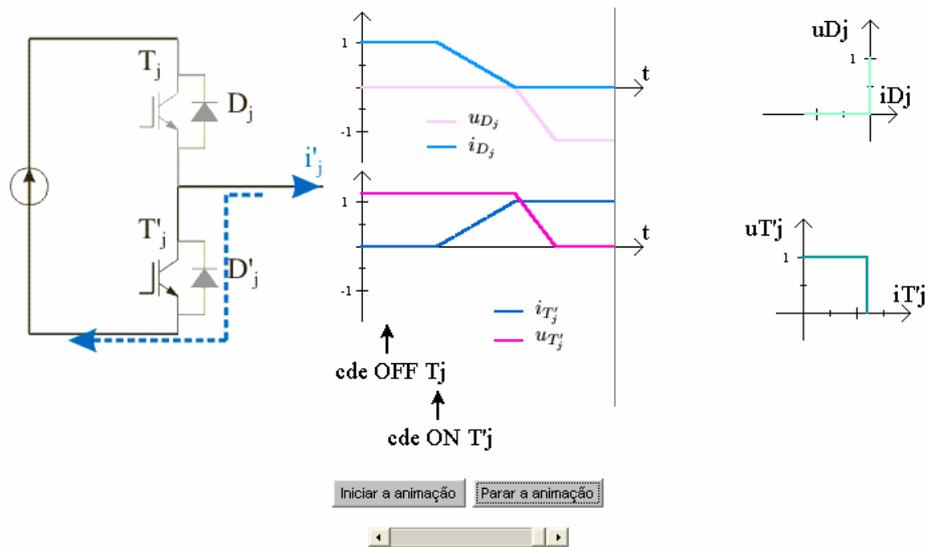


Figura 11 (animação)

### Conclusão

Para passar de  $K_j$  CONDUTOR e  $K'_j$  ao CORTE, para  $K_j$  ao CORTE e  $K'_j$  CONDUTOR, comanda-se primeiro  $T_j$  ao corte, e depois de um certo tempo  $t_d$  (tempo morto) comanda-se  $T'_j$  na saturação:

- se  $i_j > 0$ , é o comando de  $T_j$  ao corte, que desencadeia a comutação;
- se  $i_j < 0$ , é o comando de  $T'_j$  na saturação que desencadeia a comutação.

A comutação de  $K_i$  ao CORTE e  $K'_i$  CONDUTOR, para  $K_i$  CONDUTOR e  $K'_i$  ao corte é análoga, trocando  $T_i$  por  $T'_i$ .

O tempo morto  $t_d$

- deve ser suficiente para acomodar o transitório de bloqueio de  $T_i$ , estando na saturação;
- mas não deve ser exageradamente longo, porque fixa o intervalo de tempo que pode existir (se  $i_j < 0$ ) entre o instante em que se inicia o processo de comutação por bloqueio de  $T_j$  e o instante em que a comutação se completa

#### 4. CONFIGURAÇÕES POSSÍVEIS DOS ESTADOS DOS INTERRUPTORES

Tomando como referência o ponto médio da fonte  $U$ , o potencial  $P_j$  do terminal  $j$  pode apresentar dois valores (figura 12):

$$K_j ON, K'_j OFF \rightarrow P_j = U/2$$

$$K_j OFF, K'_j ON \rightarrow P_j = -U/2$$

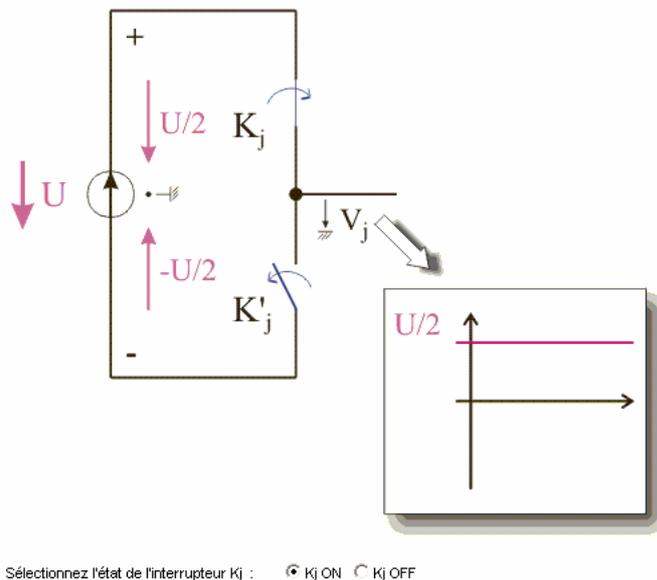


Figura 12 (animação)

Num ondulador monofásico em ponte, como existem dois braços e cada braço pode apresentar dois valores de potencial, têm-se 4 ( $2^2$ ) configurações possíveis, mas apenas três valores distintos para a tensão aos terminais da carga  $+U$ ,  $U$ ,  $0$  (figura 13)

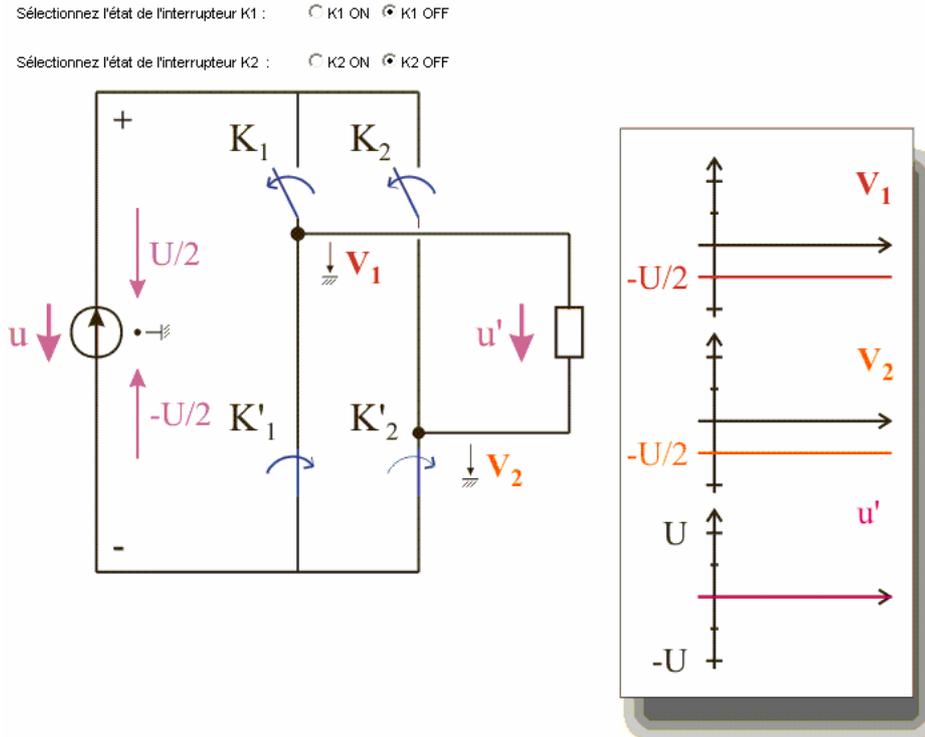


Figura 13 (Animação)

Num ondulador trifásico em ponte, considerando uma carga equilibrada, ligada em estrela e com neutro isolado (figura 14), tem-se:

$$\dot{i}'_A + \dot{i}'_B + \dot{i}'_C = 0 \quad (1)$$

$$u'_A + u'_B + u'_C = 0 \quad (2)$$

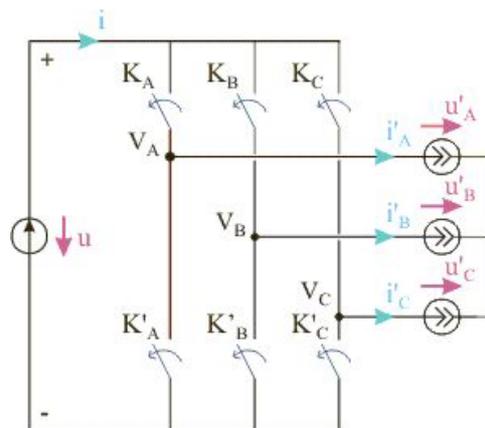


Figura 14

Aplicando as leis de Kirchhoff, as tensões  $u'_A, u'_B$  e  $u'_C$  relacionam-se com os potenciais  $P_A, P_B, P_C$  da forma seguinte

$$P_A - P_B = u'_A - u'_B \quad (3)$$

$$P_A - P_C = u'_A - u'_C \quad (4)$$

$$P_B - P_C = u'_B - u'_C \quad (5)$$

Somando as equações (3) e (4), obtém-se :

$$2P_A - P_B - P_C = 2u'_A - (u'_B + u'_C)$$

Como a carga é equilibrada,  $u'_A + u'_B + u'_C = 0$ , pelo que:

$$2P_A - P_B - P_C = 3u'_A$$

ou seja:

$$u'_A = 2/3P_A - 1/3P_B - 1/3P_C$$

Obtendo-se relações análogas para  $u'_B$  e  $u'_C$ .

No caso trifásico, como existem três braços e cada braço pode apresentar dois valores de potencial, vão existir apenas 8 ( $2^3$ ) configurações possíveis (figura 15) das 64 ( $2^6$ ) disponibilizadas por todos os estados dos 6 interruptores.

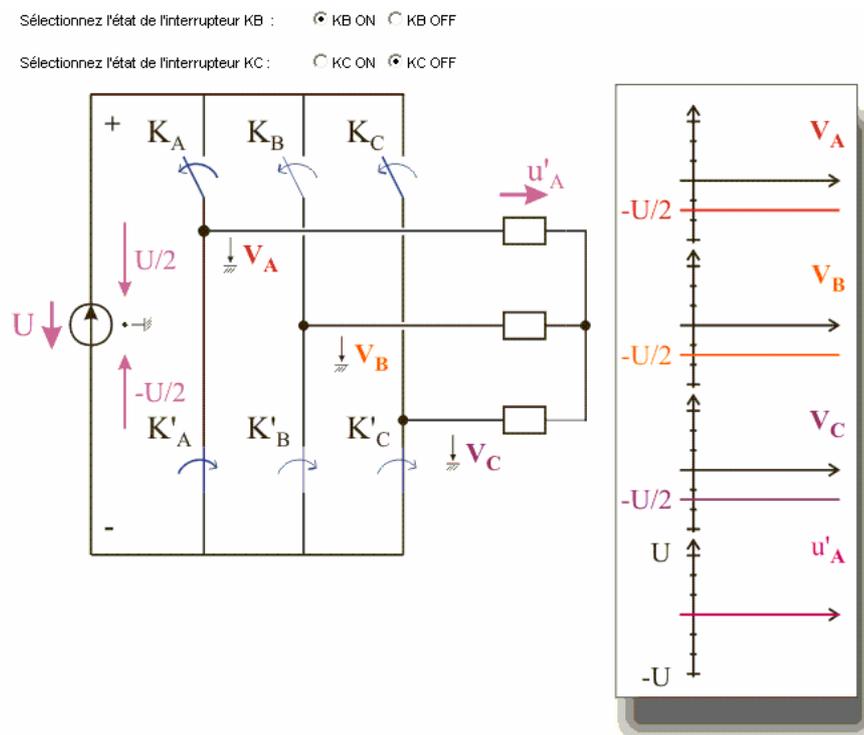


Figura 15 (Animação)

Existem 2 configurações que permitem ambas obter  $u'_A = u'_B = u'_C = 0$

- ou  $K_A$ ,  $K_B$  et  $K_C$  em CONDUÇÃO (e  $K'_A$ ,  $K'_B$  et  $K'_C$  no corte);
- ou  $K'_A$ ,  $K'_B$  et  $K'_C$  em CONDUÇÃO (e  $K_A$ ,  $K_B$  et  $K_C$  no corte).

As diferentes metodologias de comando existentes, permitem fazer suceder temporalmente as 8 combinações possíveis dos interruptores, de forma a obter as três tensões alternadas nos terminais do receptor (uma tensão é alternada se for periódica e tiver valor médio nulo), ou uma tensão alternada no caso monofásico.