

Conversores de Eletrônica de Potência para Conexão de Fontes a Microrredes

Prof. Antonio Simões Costa
Labspot - UFSC

Conversores Eletrônicos

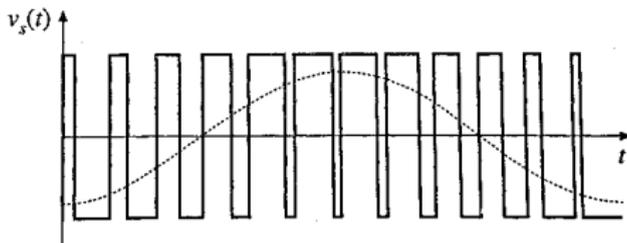
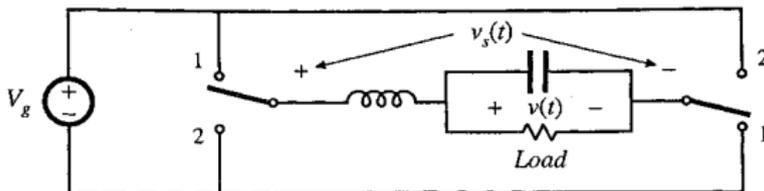
- No Capítulo 4, vimos exemplos de conversores eletrônicos que podem produzir tensões de saída **de magnitude maior** ou **de magnitude menor** do que a da tensão de entrada, dependendo da forma como o ciclo de trabalho (*duty cycle*) das chaves é programado;
- Aquela conclusão pode ser estendida:

Generalização:

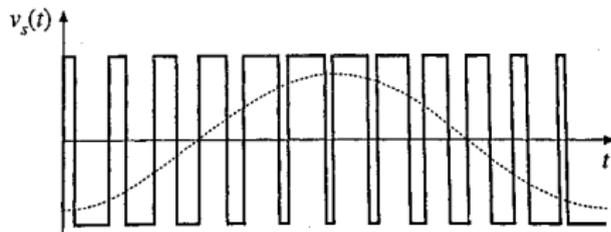
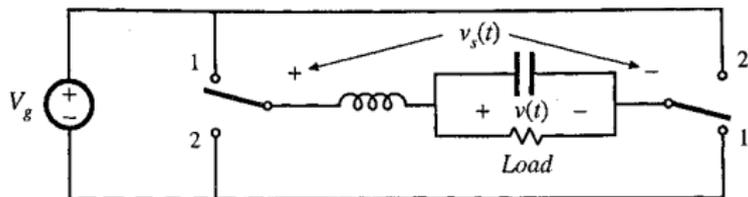
Qualquer entrada dada pode ser convertida em **qualquer saída desejada**, usando-se um conversor dotado de chaves eletrônicas inseridas em um circuito contendo elementos reativos.

Exemplo: Inversor Monofásico

- Uma aplicação particularmente interessante diz respeito ao **inversor**, que converte corrente contínua em alternada;
- A figura mostra um **circuito inversor monofásico simples** e o respectivo ciclo de trabalho:



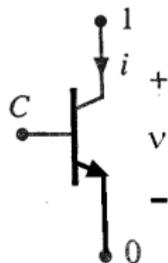
Inversor Monofásico x Filtro L-C



- Ciclo de trabalho **modulado por senóide** faz com que tensão de saída $v_s(t)$ das chaves contenha comp. senoidal de baixa frequência;
- Freq. de corte do filtro L-C escolhida para deixar passar os componentes de baixa-freq. desejados e atenuar harmônicos de alta freq. devidas ao chaveamento na tensão de saída filtrada, $v(t)$.

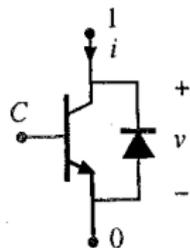
Realização de chaves eletrônicas (I)

- As chaves de alta frequência de atuação empregadas em inversores são realizadas mediante **interruptores ativos** dotados de um terminal de controle C ;
- O estado de condução de um interruptor ativo é determinado pelo sinal aplicado no terminal de controle C ;
- Interruptores ativos são dispositivos semicondutores de potência, tais como:
 - **BJT**: *Bipolar junction transistor*;
 - **IGBT**: *Insulated gate bipolar transistor*;
 - **MOSFET**: *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*;



Realização de chaves eletrônicas (II)

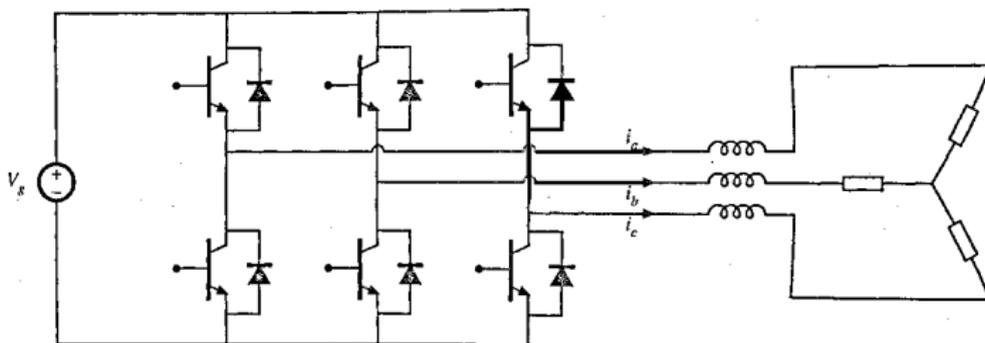
- Na aplicação de chaves eletrônicas a inversores, entretanto, exige-se que:
 - chaves conduzam correntes de ambas as polaridades, mas
 - bloqueiem somente tensões positivas.
- Para atender as especificações acima com BJTs e IGBTs, a realização das chaves necessita ainda de um diodo conectado em antiparalelo com o transistor:



Inversor Fonte de Tensão (Trifásico)

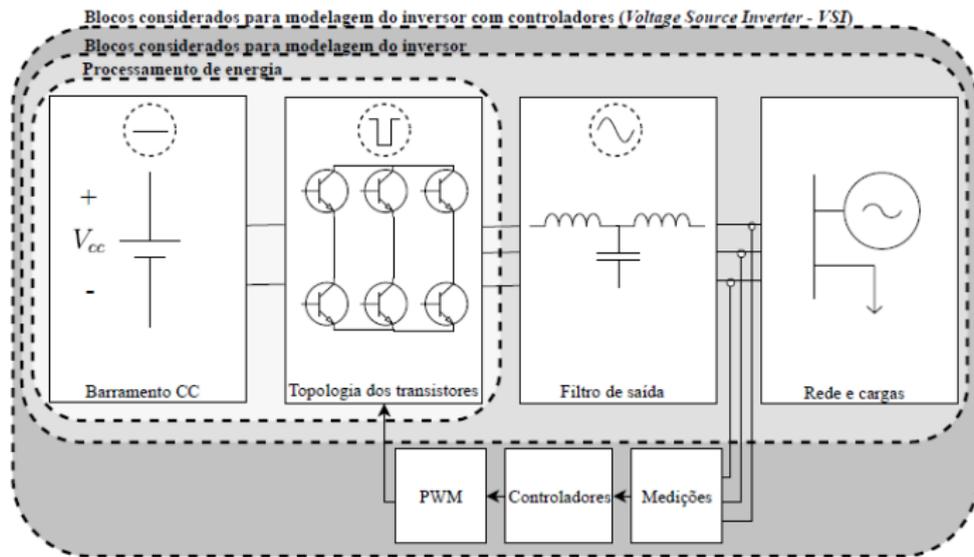
(Voltage Source Inverter)

- O **Inversor Fonte de Tensão (VSI)** é o inversor mais utilizado para a conexão de fontes renováveis a microrredes ou redes convencionais;
- É composto por três interruptores de um polo e duas posições (cada um deles contendo 2 transistores com seus diodos em antiparalelo):



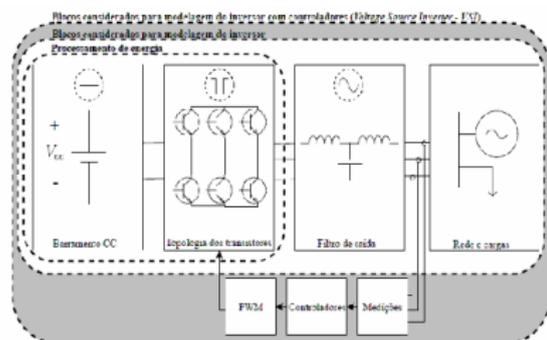
VSI para Conexão de Fonte Primária a Microrredes

- Barramento CC representa a fonte primária de geração;
- Diferentemente de filtro L do inversor anterior, utiliza-se um filtro LCL .



Operação do VSI

- VSI opera de forma bidirecional, com características de:
 - *Conv. Buck*, quando retira energia do barramento CC e injeta na rede;
 - *Conv. Boost*, no sentido contrário.
- O processamento de energia é feito via chaveamento dos transistores e modulação *PWM*;
- A estratégia de modulação é implementada mediante placas *DSP (Digital Signal Processor)* ou *FPGA (Field Programmable Gate Array)*.

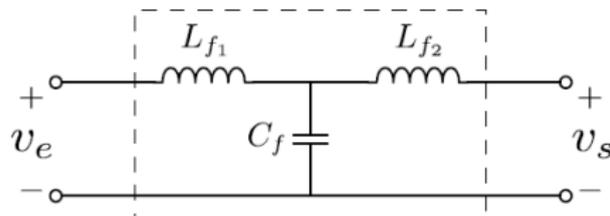


Filtros de Saída (I)

- Responsável pela **atenuação dos harmônicos de tensão e corrente** originados no processo de comutação de **frequências mais altas** que a frequência fundamental;
- Tipos de filtro comumente utilizados:
 - **Filtro L** : consiste de um único indutor em série na saída do VSI:
 - Resp. dinâmica lenta, devido à elevada queda de tensão em L ;
 - Tende a exigir frequências de chaveamento mais altas \Rightarrow maiores perdas de comutação.
 - **Filtro LC** : formado por um indutor e um capacitor *shunt*:
 - Com valores mais altos de C , valor de L pode ser reduzido \Rightarrow menores perdas e menor custo;
 - Porém altos valores de C pode ocasionar elevadas correntes de *inrush*;
 - Possibilidade de ressonância.

Filtros de Saída (II)

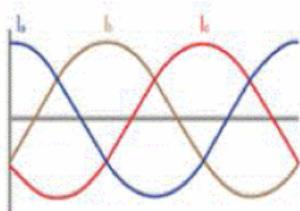
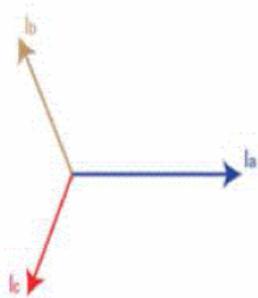
- **Filtro *LCL***: composto por dois indutores e capacitor *shunt* intermediário;



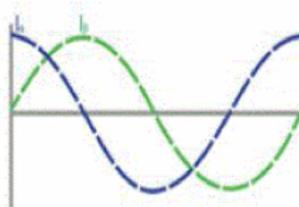
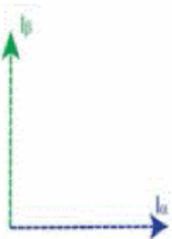
- Características:
 - Melhor atenuação (e menos *ripple* de corrente) que filtro *LC*;
 - Menor dependência dos parâmetros da rede para bom desempenho;
 - Menores valores de *L* e *C* (grande vantagem em aplicações de alta potência);
 - Saída indutiva, reduz correntes de *inrush*;
 - Persiste a necessidade de cuidados com características de ressonância;
 - Torna controle dos VSIs um pouco mais complexo.

Os Três Sistemas de Referência

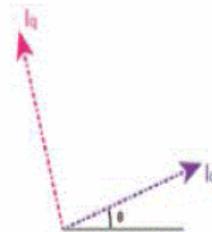
Sistema 3 ϕ original



Sistema 2 ϕ estacionário
(Transf. $\alpha\beta$ de Clarke)



Sistema rotativo
(Transf. dq de Park)



Transformação de Clarke

- Permite transformar quantidades trifásicas (a, b, c) em quantidades bifásicas (α, β, γ) hipotéticas, ambas com relação a eixos estacionários;
- A transformação $(a, b, c) \rightarrow (\alpha, \beta, \gamma)$ é dada por:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_\gamma \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

- A potência elétrica é invariante sobre esta transformação:
 $v_{abc} \cdot i_{abc} = v_{\alpha\beta\gamma} \cdot i_{\alpha\beta\gamma}$;
- Se $\mathbf{T}_{\alpha\beta\gamma}$ é a matriz de transformação acima, então a transformação inversa é dada por $\mathbf{T}_{\alpha\beta\gamma}^{-1} = \mathbf{T}_{\alpha\beta\gamma}^t$;
- Sob condições balanceadas, $v_\gamma = 0$.

Transformação de Park

- Neste caso, as variáveis são referidas a eixos ortogonais d e q que giram à velocidade síncrona;
- Quando expressas em relação aos eixos d e q , quantidades trifásicas tornam-se constantes;
- Transformação $(a, b, c) \rightarrow (d, q, 0)$:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

onde θ é o ângulo entre o eixo da fase a e o eixo d , e o eixo q é suposto estar 90° adiantado do eixo d ;

- Se \mathbf{T}_θ é a matriz de transformação acima, então $\mathbf{T}_\theta^{-1} = \mathbf{T}_\theta^t$.

Do Sistema Bifásico Estacionário para o Rotativo

- A passagem de coordenadas (α, β, γ) para coordenadas $(d, q, 0)$ é dada por:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_\gamma \end{bmatrix}$$

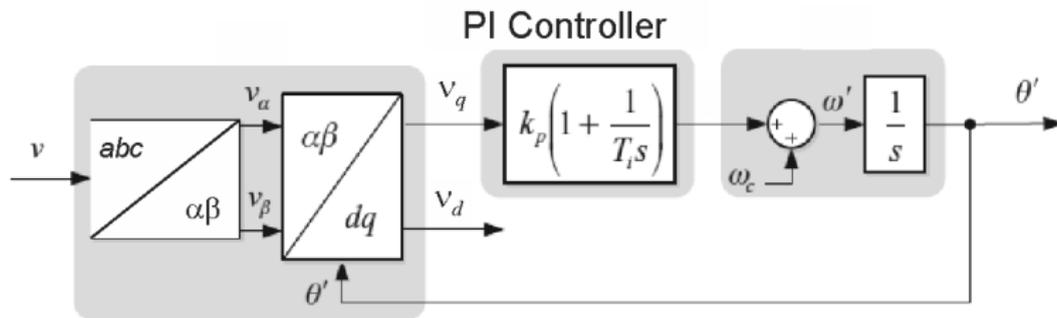
- Se \mathbf{T}_{dq0} é a matriz de transformação acima, então $\mathbf{T}_{dq0}^{-1} = \mathbf{T}_{dq0}^t$.

Sincronização com a Rede

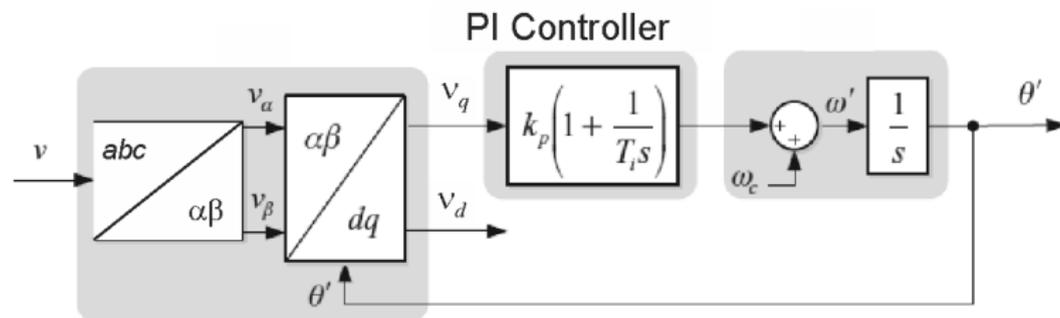
- A sincronização de tensão das fontes de geração com a rede no ponto de conexão é outra função importante dos controladores de VSIs;
- As fontes devem permanecer sincronizadas mesmo sob ocorrências de perturbações de curta duração na rede;
- **Ângulo de fase da tensão no ponto de conexão**: informação fundamental para sincronização \Rightarrow importância da detecção rápida e precisa da componente de sequência positiva da tensão da rede;
- A técnica mais utilizada para a sincronização com a rede utiliza o chamado *Phase-Locked Loop (PLL)*.

Phase-Locked Loop no Sistema de Referência Síncrono (I)

- O *PLL* mais utilizado é implementado no sistema de referência síncrono (*dq*) ;
- O diagrama apresenta dois estágios de conversão da tensão da rede: do sistema 3ϕ original para o sistema 2ϕ em coordenadas $\alpha\beta$, e deste último para o sistema dq ;
- Utiliza um controlador *PI* (Proporcional-Integral) para rastrear o ângulo de fase da tensão da rede.



Phase-Locked Loop (PLL) (II)

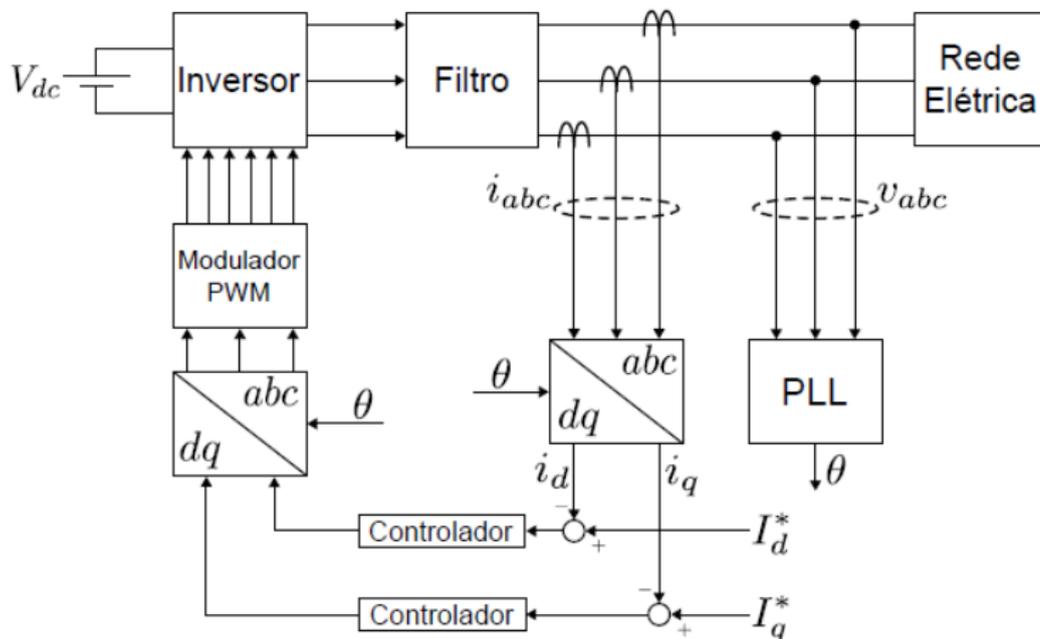


- A sincronização é obtida quando a tensão do eixo- q torna-se igual a zero em reg. perm. $\Rightarrow v_q = 0$;
- PLL satisfatório em condições balanceadas, mas requer aperfeiçoamentos sob condições desbalanceadas.

Controle de VSIs no Sistema de Referência dq

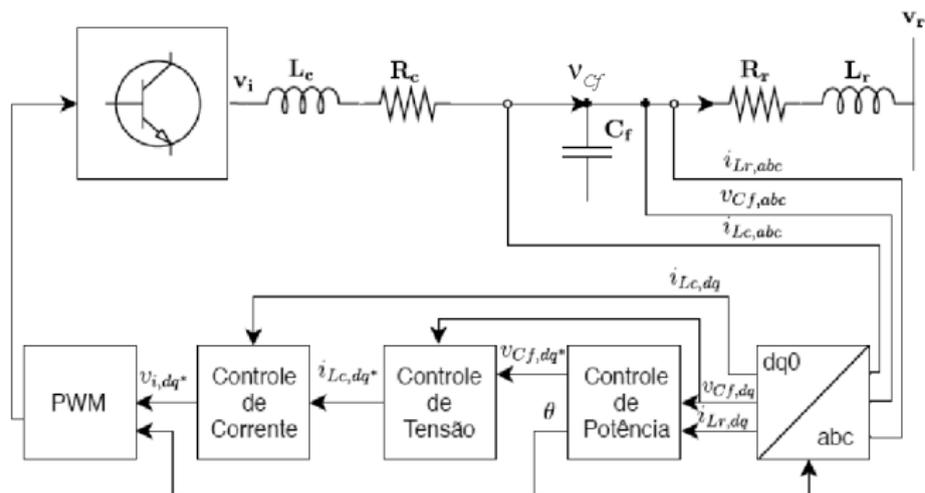
- A implementação de controladores de corrente no sistema de referência dq requer que tensões e correntes sejam transformadas para variáveis dq correspondentes via **Transformação de Park**;
- **Vantagem**: variáveis de controle serão **sinais CC** \Rightarrow aplicação de técnicas convencionais de sistemas de controle linear é facilitada.
- A transformação de Park requer **informação do ângulo de fase da tensão da rede** \Rightarrow necessidade de **PLL**.

Estrutura de Controle no Sistema de Referência dq



Controle através de Controlador Multimalhas

- Uma estratégia de controle muito usada para microrredes utiliza topologia multimalhas;
- As malha externa, intermediária e interna controlam a **potência entregue à rede**, a **tensão** e a **corrente**, respectivamente.



Modelagem de Inversores (I)

Hipóteses adotadas

- A modelagem de inversores será baseada nas seguintes hipóteses simplificadoras:
 - Os interruptores são considerados ideais;
 - Desconsidera-se a dinâmica das fontes de geração ligadas ao barramento CC do inversor \Rightarrow tensão CC constante;
 - A função de comutação é representada a partir de um modelo médio.
- O **Modelo Médio** da função de comutação de conversores é uma estratégia conveniente para modelar as etapas de processamento de energia;
- Seu uso implica na desconsideração de dinâmicas em frequências mais elevadas do que a frequência de comutação do inversor (não causa perdas significativas no modelo).

Modelagem de Inversores (II)

Modelo Médio para Representação de Inversores (I)

- Aplicando-se as simplificações mencionadas, o barramento CC e os transistores são representados como abaixo:

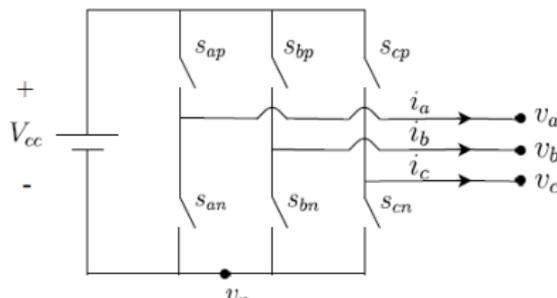
- Interruptores

S_{ap} , S_{bp} , S_{cp} conectados ao polo + do barram. CC;

- Interruptores

S_{an} , S_{bn} , S_{cn} conectados ao polo - do barram. CC;

- Função de comutação: $s_{xy}(t) = \begin{cases} 1, & \text{se } s_{xy} \text{ está conduzindo} \\ 0, & \text{se } s_{xy} \text{ está bloqueado} \end{cases}$
onde $x \in \{a, b, c\}$ e $y \in \{p, n\}$.



Modelagem de Inversores (III)

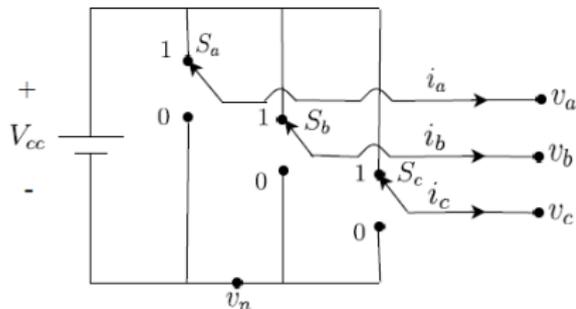
Modelo Médio para Representação de Inversores (II)

- Interruptores conectados à mesma fase não podem conduzir simultaneamente (ocasionaria curto-circ.). Portanto:

$$s_{xp} + s_{xn} = 1$$

- A conclusão acima leva à representação dos interruptos. como chaves de um polo e duas posições;
- A tensão de saída de cada fase é então obtida como:

$$V_X = s_X V_{CC}$$



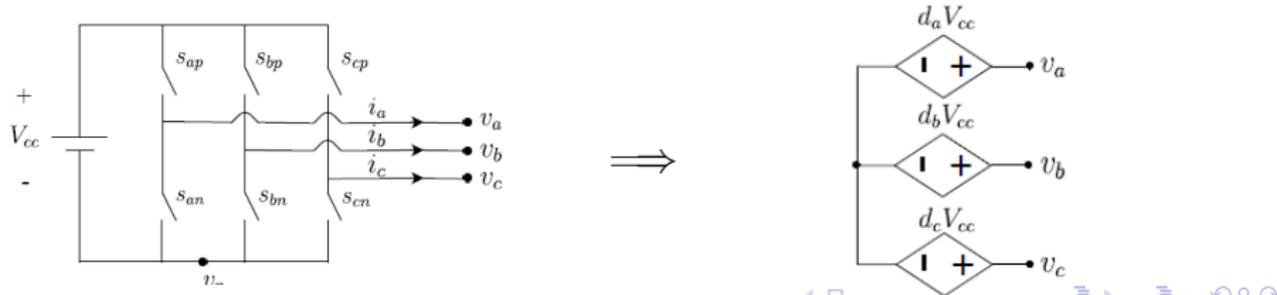
Modelagem de Inversores (IV)

Modelo Médio para Representação de Inversores (III)

- Se T_c é o período de comutação e $x \in \{a, b, c\}$, valor médio da função de comutação é calculado como:

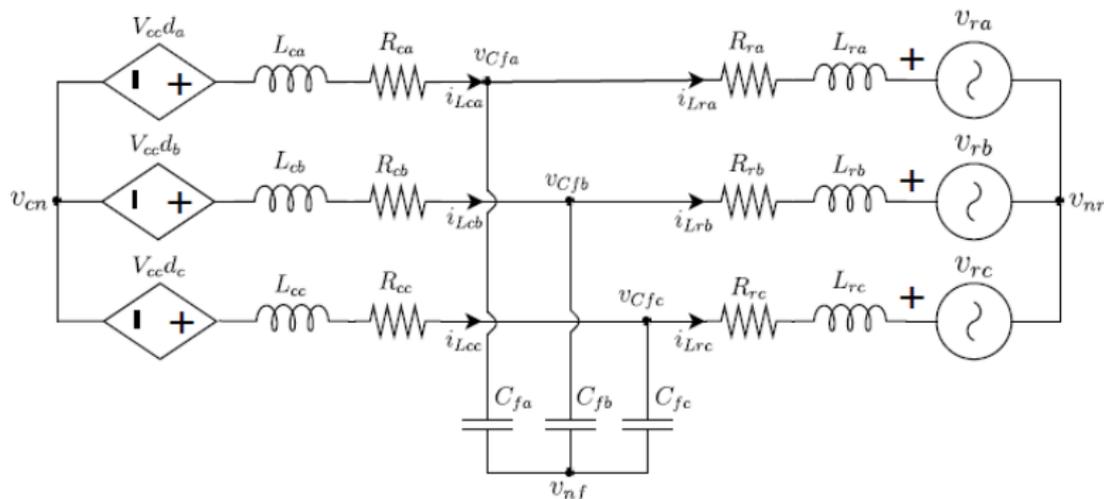
$$d_x = \int_{t-T_c}^t s_x(\tau) d\tau$$

- O modelo comutado (à esq.) pode ser interpretado como um modelo médio de tensão controladas (à dir.):



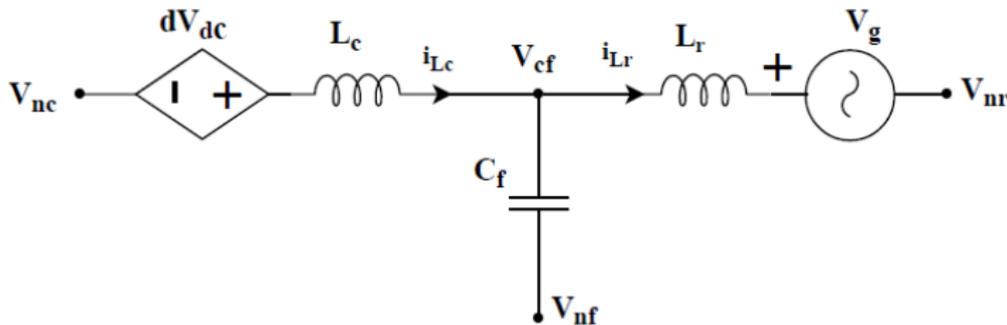
Circuito Equiv. de Inversor Trifásico Alimentando Carga

- Processamento de energia do inversor representado por modelo médio, filtro LCL com perdas resistivas, rede+carga representadas por fonte de tensão:



Modelo Unifilar e Representação de Estado

- Admitindo-se condições balanceadas, o modelo 3 ϕ do inversor pode ser simplificado para um modelo **vetorial** unifilar:



- Variáveis de estado:** $\mathbf{x}_{abc} = [\mathbf{i}_{Lc}, \mathbf{i}_{Lr}, \mathbf{v}_{Cf}]^t$, onde $\mathbf{i}_{Lc} = [i_{Lc,a}, i_{Lc,b}, i_{Lc,c}]^t$, etc; **Entrada:** $\mathbf{u}_{abc} = [d\mathbf{V}_{dc}, \mathbf{V}_g]$;
- Representação em variáveis de estado:

$$\dot{\mathbf{x}}_{a,b,c} = \mathbf{A}_{abc}\mathbf{x}_{abc} + \mathbf{B}_{abc}\mathbf{u}_{abc}$$

Representação em Coordenadas dq (I)

- Para realizar o projeto de controladores no sistema de referência dq , a representação de estado acima deve ser submetida à transformação de Park;
- Como a transformação envolve termos em $\sin \theta$ e $\cos \theta$, o modelo resultante é não-linear e, para a aplicação desejada, precisa ser linearizado;
- Resulta um modelo do tipo

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du}\end{aligned}$$

Representação em Coordenadas dq (II)

- As variáveis de estado são:

$$\mathbf{x} = \left[\Delta i_{Lc,d} \quad \Delta i_{Lc,q} \quad \Delta v_{Cf,d} \quad \Delta v_{Cf,q} \quad \Delta i_{Lr,d} \quad \Delta i_{Lr,d} \right]^t$$

- As entradas são:

$$\mathbf{u} = \left[\Delta v_{c,d} \quad \Delta v_{c,q} \quad \Delta v_{r,d} \quad \Delta v_{r,q} \quad \Delta \omega \right]^t$$

- As matrizes **A**, **B**, **C**, **D** são constantes e dependem apenas dos parâmetros da rede e da frequência nominal.