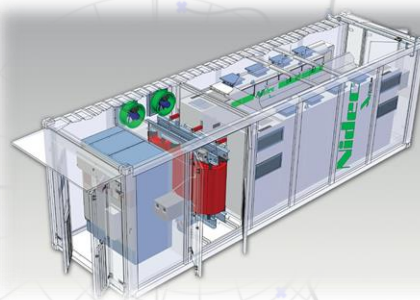




# Fundamentos de modelagem e controle de sistemas de armazenamento de único estágio de conversão

Prof. Allan Fagner Cupertino  
afcupertino@ieee.org



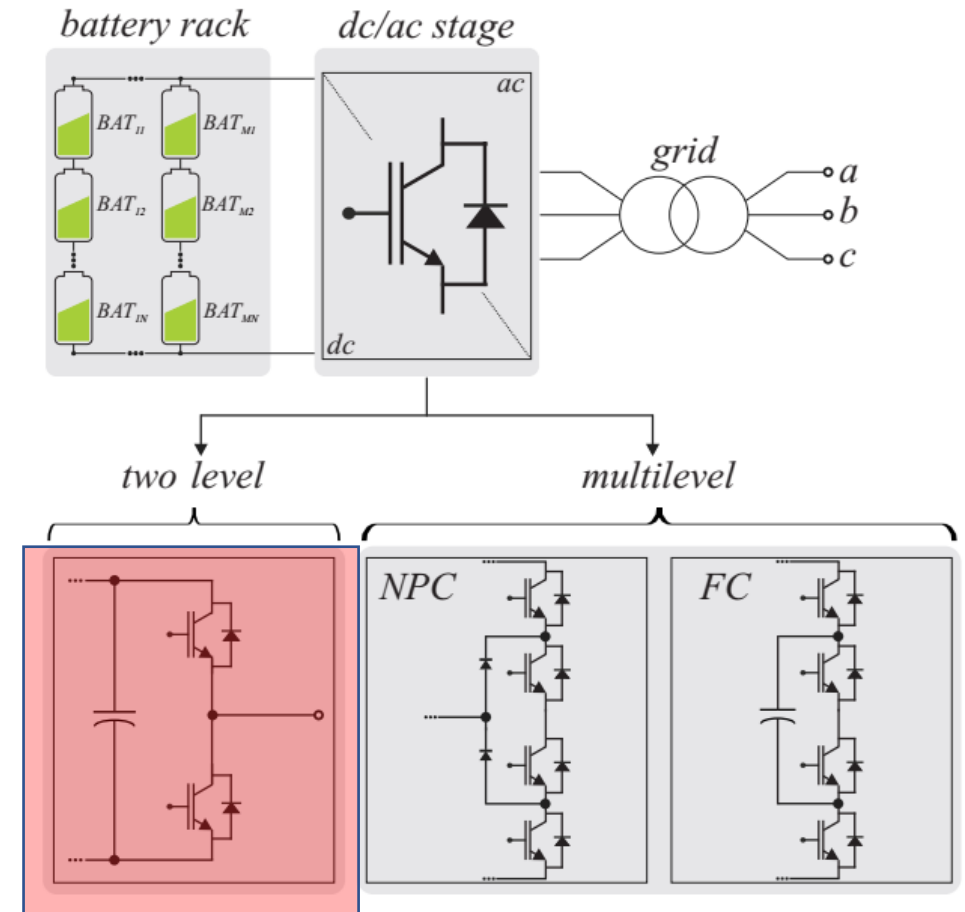
# Tópicos a serem abordados

- Teoria de vetores espaciais;
- Transformação de Clarke e Park;
- Potência instantânea em outros referenciais;
- Malha de sincronismo de fase;
- Controle de corrente do inversor.



# Objetivos de controle

- ❑ Controlar a potência ativa e reativa na rede elétrica;
- ❑ Sincronização com a rede elétrica;
- ❑ Realizar a carga e descarga das baterias;
- ❑ Modos de carregamento **CC** e CV;

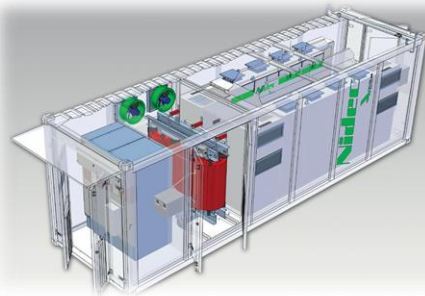


Fonte: Jonathan H. D. G. Pinto, “Modeling, Design and Performance Evaluation of Battery Energy Storage Systems based on Modular Multilevel Converter”, 2020.



# Teoria de vetores espaciais

Prof. Allan Fagner Cupertino  
[afcupertino@ieee.org](mailto:afcupertino@ieee.org)



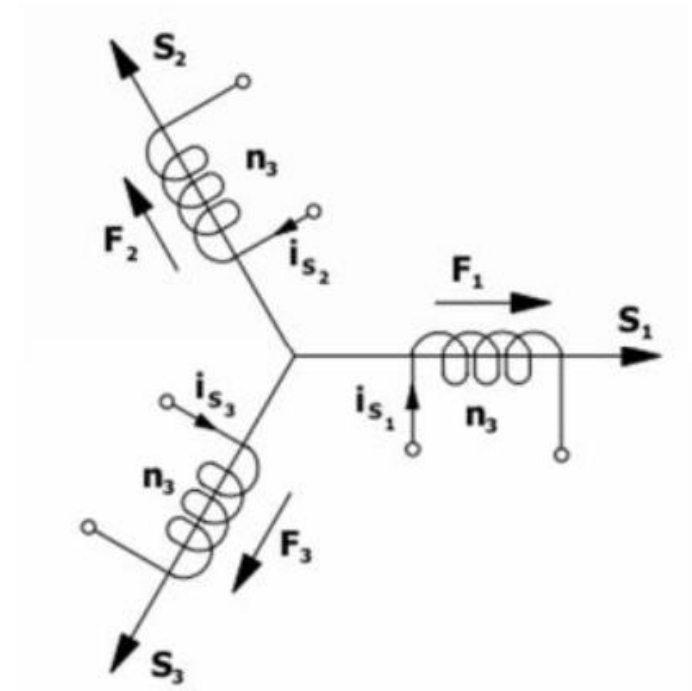
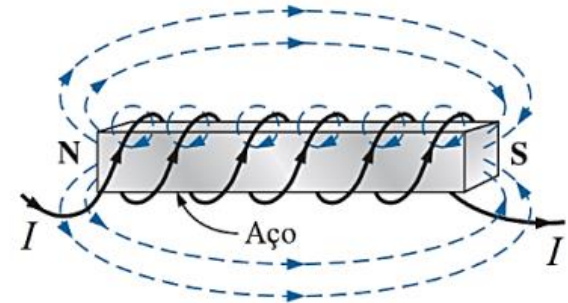
# Teoria de vetores espaciais

- ❑ Teoria originada no estudo de máquinas elétricas;
- ❑ Aplicado no estudo de inversores e sistemas de potência;
- ❑ Baseada em uma observação simples;
- ❑ Atribuição de direção e sentido à corrente (Kovacs);
- ❑ “Fasores espaciais”.

Fontes:

[1] Boylestad, R. L. . “Introdução a análise de circuitos”.

[2] Barbi, Ivo. “Teoria fundamental do motor de indução”.



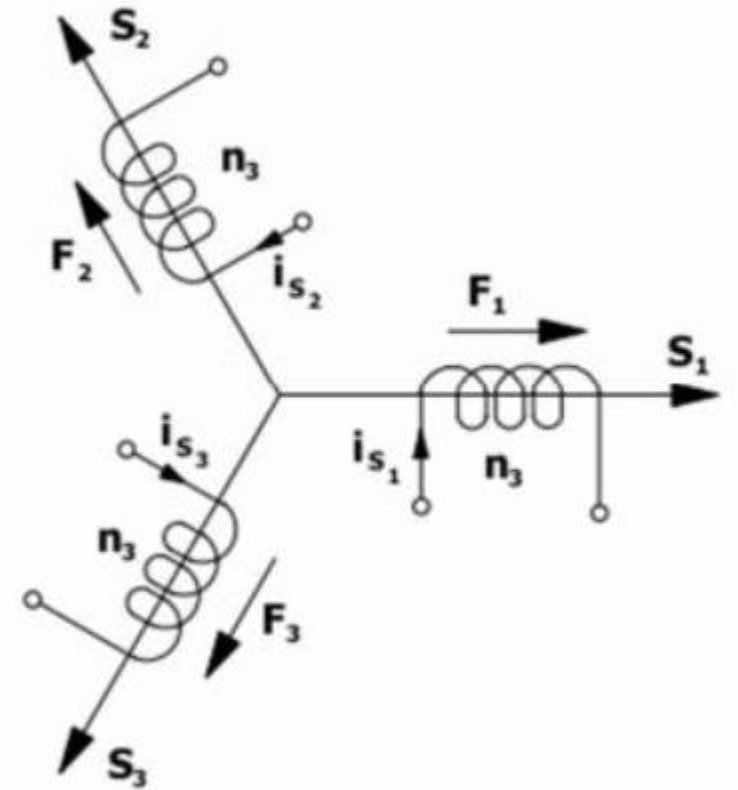
# Teoria de vetores espaciais – caso genérico

$$\begin{cases} |F_a(t)| = N_a |i_a(t)| \\ |F_b(t)| = N_b |i_b(t)| \\ |F_c(t)| = N_c |i_c(t)|. \end{cases}$$

$$\vec{F}_R = \vec{F}_a + \vec{F}_b + \vec{F}_c.$$

$$\vec{F}_R = N_a i_a(t) e^{j0} + N_b i_b(t) e^{j\frac{2\pi}{3}} + N_c i_c(t) e^{j\frac{4\pi}{3}}.$$

$$\vec{F}_R = N \left( i_a(t) e^{j0} + i_b(t) e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_c(t) e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) = N \vec{i}.$$



## Problema: variação da amplitude

$$\begin{cases} i_a(t) = \hat{I} \cos(\omega_n t + \theta_0) \\ i_b(t) = \hat{I} \cos\left(\omega_n t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_c(t) = \hat{I} \cos\left(\omega_n t + \theta_0 - \frac{4\pi}{3}\right). \end{cases} \quad \rightarrow \quad \vec{i} = \frac{3}{2} \hat{I} e^{j(\omega_n t + \theta_0)}.$$

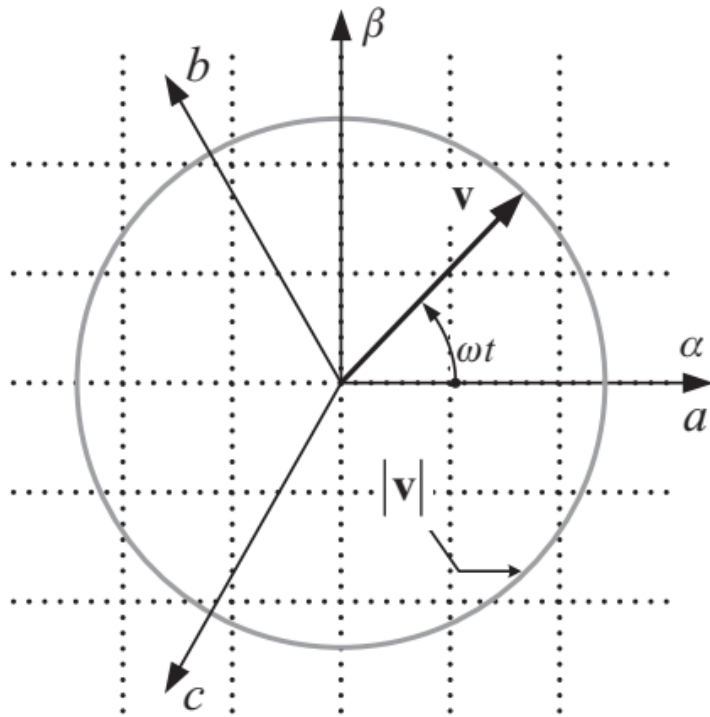
□ Condição de invariância em amplitude:

$$\vec{i} = \frac{2}{3} \left( i_a(t) e^{j0} + i_b(t) e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_c(t) e^{j\frac{4\pi}{3}} \right)$$

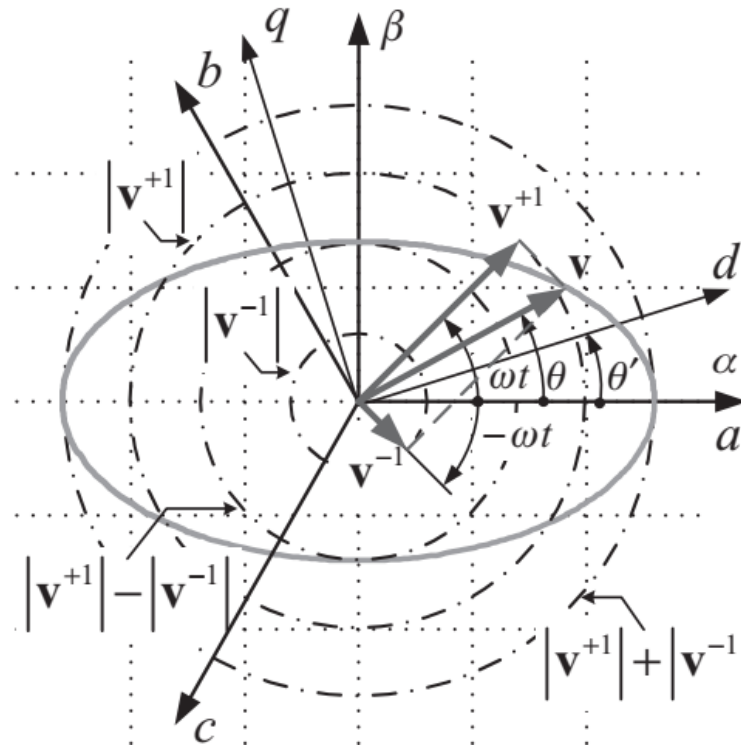
$$\vec{v} = \frac{2}{3} \left( v_a(t) e^{j0} + v_b(t) e^{j\frac{2\pi}{3}} + v_c(t) e^{j\frac{4\pi}{3}} \right)$$

# Exemplo – Vetor espacial de tensões trifásicas

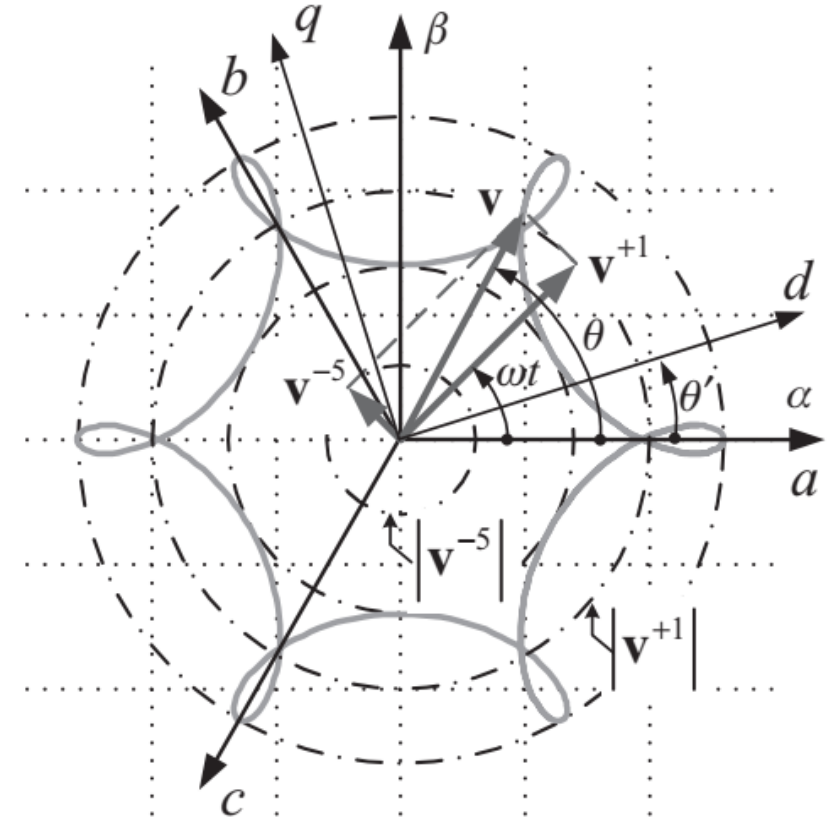
Condição equilibrada



Rede desequilibrada



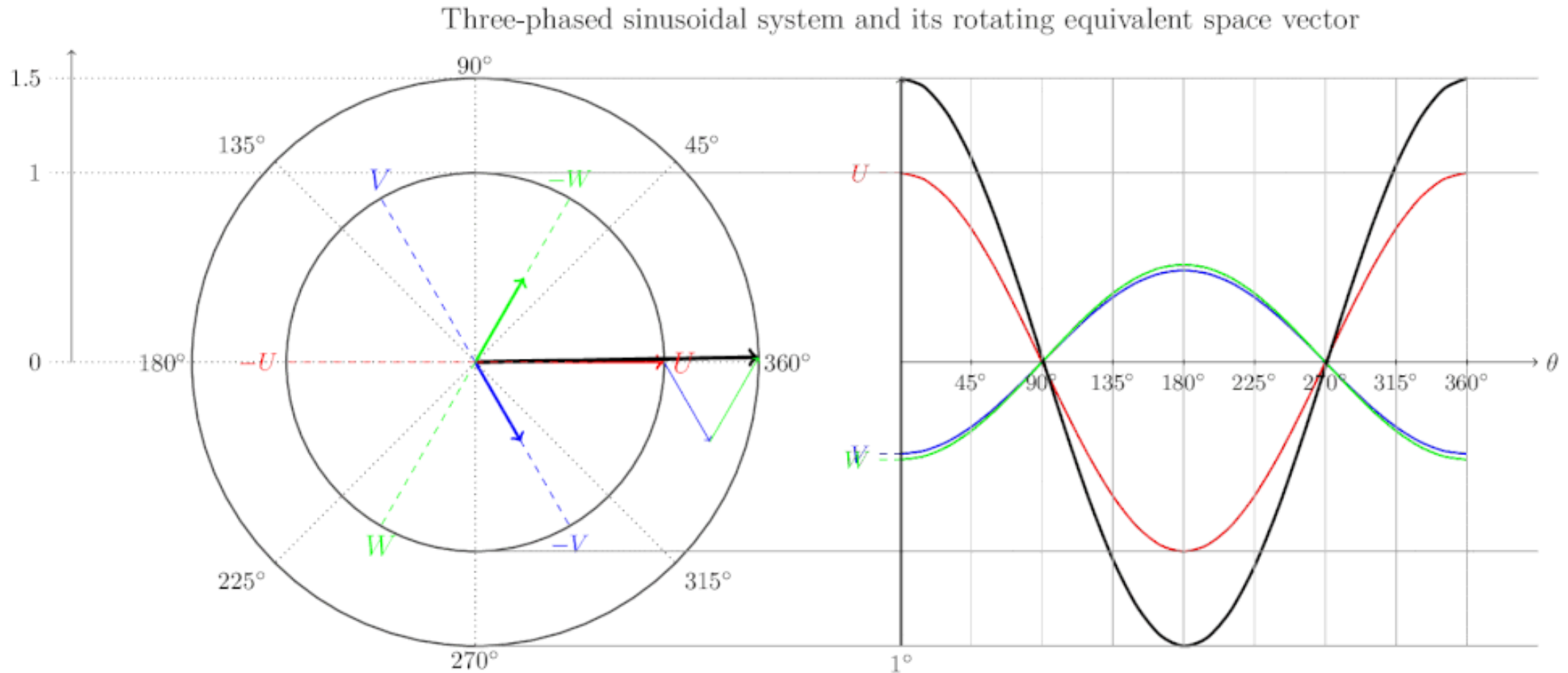
Rede distorcida



Fonte: R. Teodorescu, M. Liserre e P. Rodriguez. “Grid converters for photovoltaic and wind power systems”. Wiley. 2011.



# Exemplo – Vetor espacial de tensões trifásicas

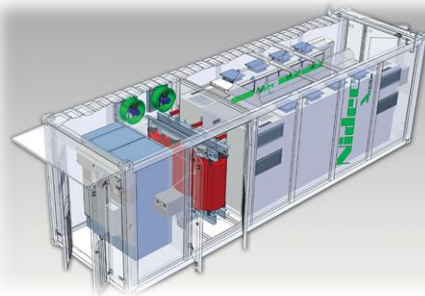


Fonte: <https://www.switchcraft.org/learning/2017/3/15/space-vector-pwm-intro>



# Transformação de Clarke

Prof. Allan Fagner Cupertino  
[afcupertino@ieee.org](mailto:afcupertino@ieee.org)

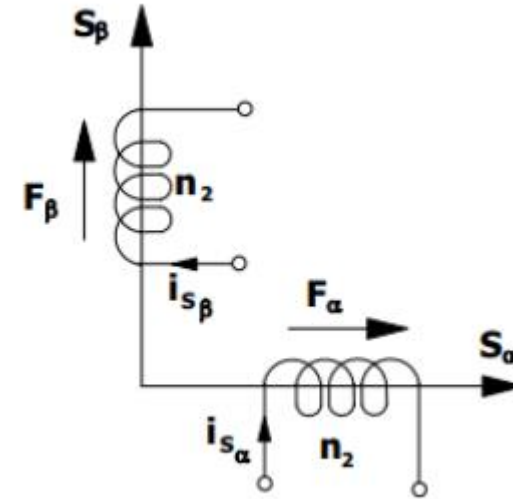
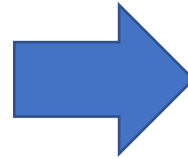
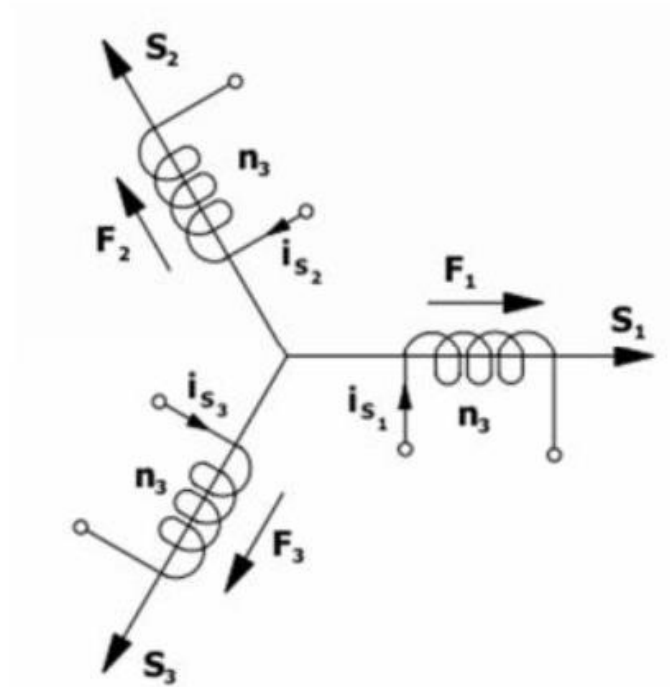


# Transformação de Clarke

- ❑ Proposta de Edith Clarke em 1951;
- ❑ Eixos magnéticos não são ortogonais!
- ❑ Em sistemas trifásicos a 3 fios, não são necessárias 3 equações diferenciais para descrever um sistema trifásico!
- ❑ Isto acontece porque:  $i_c = -i_b - i_a$ ;
- ❑ Resulta em simplificações;
- ❑ Transformação  $\alpha\beta 0$

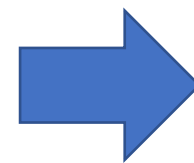
Fonte: W. C. Duesterhoeft, M. W. Schulz and E. Clarke, "Determination of Instantaneous Currents and Voltages by Means of Alpha, Beta, and Zero Components," in Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. 1951.

# Fundamentos – Transformação de Clarke



$$F_\alpha = F_a + F_b \cos \frac{2\pi}{3} + F_c \cos \frac{4\pi}{3}$$

$$F_\beta = 0 + F_b \sin \frac{2\pi}{3} + F_c \sin \frac{4\pi}{3}$$



$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{N_3}{N_2} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

## Inclusão da componente de sequência zero

- Para que a transformação inversa exista, a matriz deve ser quadrada;

$$i_0 = k \frac{N_3}{N_2} (i_a + i_b + i_c) \quad \rightarrow \quad \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{N_3}{N_2} \begin{bmatrix} k & k & k \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

- Para garantir a invariância em potência, a matriz de transformação deve ser **ortogonal**.

$$\begin{cases} k = \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{N_3}{N_2} = \sqrt{\frac{2}{3}} \end{cases}$$

# Transformação de Clarke

□ Invariante em potência

$$[T_{0\alpha\beta}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

$$[T_{0\alpha\beta}]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

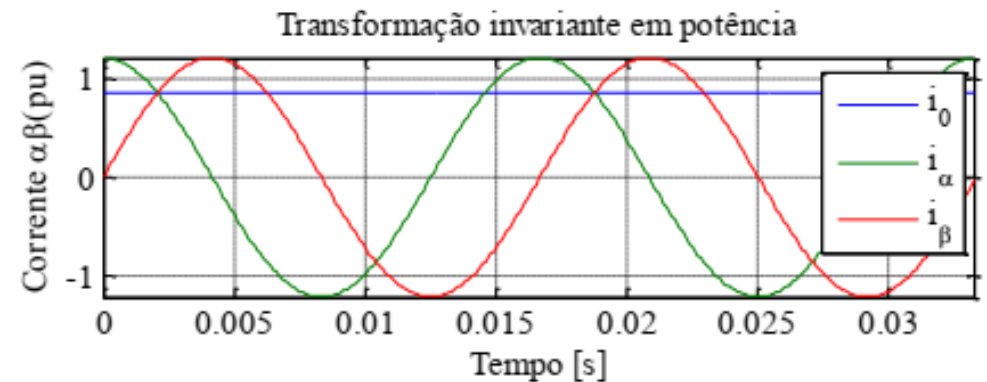
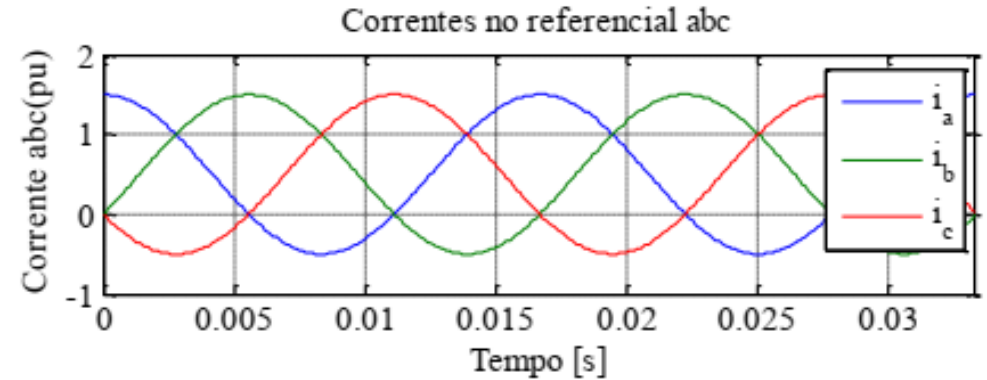
□ Invariante em amplitude

$$[T_{0\alpha\beta}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

$$[T_{0\alpha\beta}]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

# Exemplo: Transformação de Clarke

$$\begin{cases} i_a(t) = \hat{I}_a \cos(377 t) + \frac{\hat{I}_a}{2} \\ i_b(t) = \hat{I}_b \cos\left(377 t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{\hat{I}_a}{2} \\ i_c(t) = \hat{I}_c \cos\left(377 t - \frac{4\pi}{3}\right) + \frac{\hat{I}_a}{2} \end{cases}$$



# Transformação de Clarke e vetor espacial

□ Caso geral:

$$\vec{i} = \frac{2}{3} \left( i_a(t) e^{j0} + i_b(t) e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_c(t) e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) = i_\alpha(t) + j i_\beta(t)$$

□ Condições equilibradas:

$$\vec{i} = \hat{I} e^{j(\omega_n t + \theta_0)} = i_\alpha(t) + j i_\beta(t) = \hat{I} (\cos(\omega_n t + \theta_0) + j \sin(\omega_n t + \theta_0))$$

□ Corrente de sequência zero só existe em sistemas trifásicos a 4 fios!

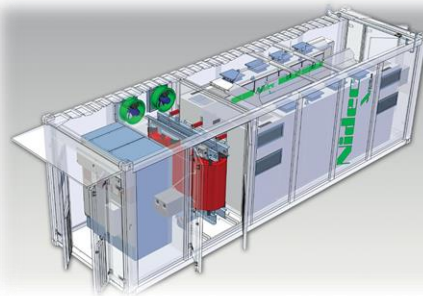
□ Inversor 2 níveis não gera nenhuma corrente de sequência zero.





# Transformações de Park

Prof. Allan Fagner Cupertino  
[afcupertino@ieee.org](mailto:afcupertino@ieee.org)



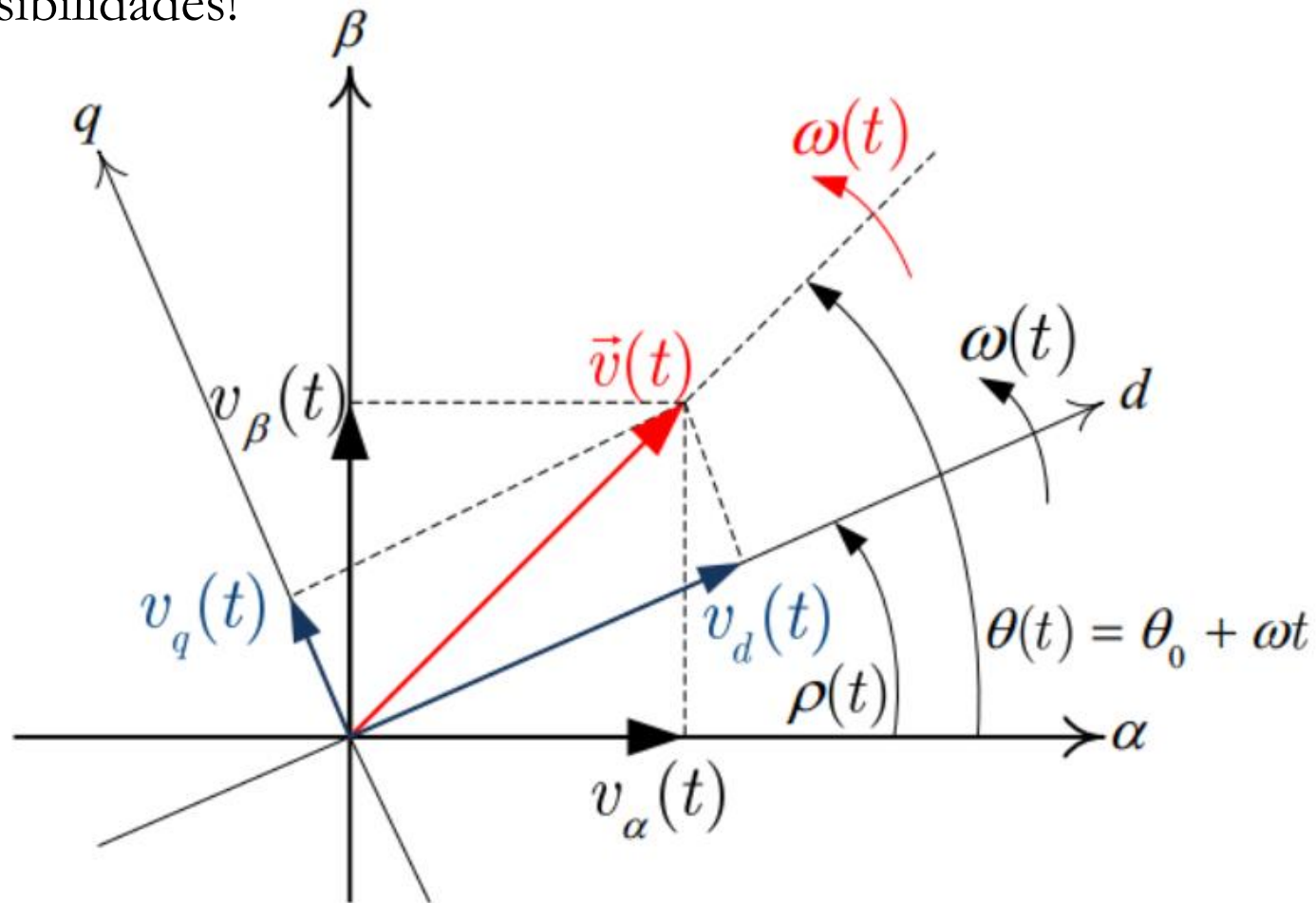
# Transformação de Park

- ❑ Proposta de Robert H. Park em 1929;
  
- ❑ Empregado no estudo de dinâmica de máquinas síncronas;
  
- ❑ Resulta em uma grande simplificação que permitia simular máquinas elétricas;
  - Simplificação 1: Redução de ordem de 3 para 2 (como na transformação de Clarke);
  - Simplificação 2: Indutâncias “deixam de variar” com a posição do rotor;
  
- ❑ Muito útil no controle de motores elétricos;
  
- ❑ Utilizado no controle de inversores!!!

Fonte: R. H. Park, "Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis" in Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1929.

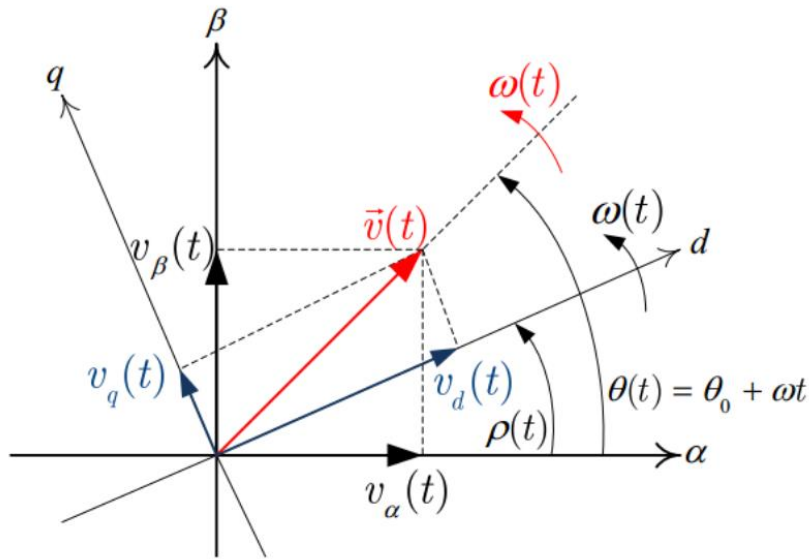
# Transformação de Park - conceito

□ Diferentes possibilidades!



Fonte: Pedro Machado de Almeida, "Modelagem e Controle de Conversores Estáticos Fonte de Tensão Utilizados em Sistemas de Geração Fotovoltaicos Conectados a Rede Elétrica de Distribuição". Dissertação de Mestrado. UFJF. 2011.

# Transformação de Park - conceito



$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \rho & \text{sen } \rho \\ 0 & -\text{sen } \rho & \cos \rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \rho & \text{sen } \rho \\ 0 & -\text{sen } \rho & \cos \rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Fonte: Pedro Machado de Almeida, "Modelagem e Controle de Conversores Estáticos Fonte de Tensão Utilizados em Sistemas de Geração Fotovoltaicos Conectados a Rede Elétrica de Distribuição". Dissertação de Mestrado. UFJF. 2011.

# Transformação de Park invariante em amplitude

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \cos \rho & \cos \left( \rho - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \rho - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\text{sen } \rho & -\text{sen} \left( \rho - \frac{2\pi}{3} \right) & -\text{sen} \left( \rho - \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

- ❑ Contudo, fazer duas transformações ( $abc \rightarrow \alpha\beta 0$  e  $\alpha\beta 0 \rightarrow dq0$ ) é preferível na prática;
- ❑ Isto porque neste caso calcula-se apenas duas funções trigonométricas!
- ❑ Menor esforço computacional!

## Exemplo: Transformação de Park

$$\begin{cases} i_a(t) = \hat{I}_a \cos(377 t + \theta) + \frac{\hat{I}_a}{2} \\ i_b(t) = \hat{I}_b \cos\left(377 t - \frac{2\pi}{3} + \theta\right) + \frac{\hat{I}_a}{2} \\ i_c(t) = \hat{I}_c \cos\left(377 t - \frac{4\pi}{3} + \theta\right) + \frac{\hat{I}_a}{2} \end{cases}$$

□ Calcular a transformação de Park para os seguintes valores de  $\rho$ :

$$\rho = 0 \text{ e } \theta = 0^\circ$$

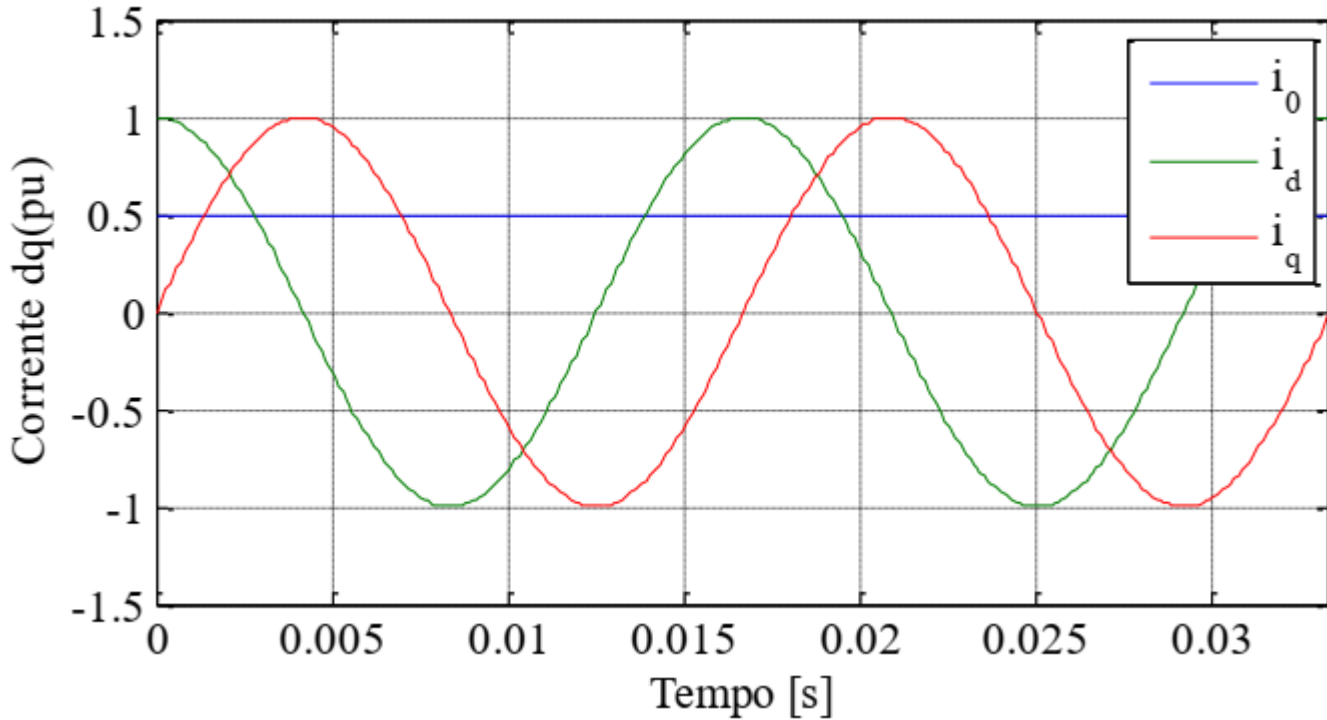
$$\rho = 377t \text{ e } \theta = 0^\circ$$

$$\rho = -377t \text{ e } \theta = 0^\circ$$

# Exemplo: Transformação de Park

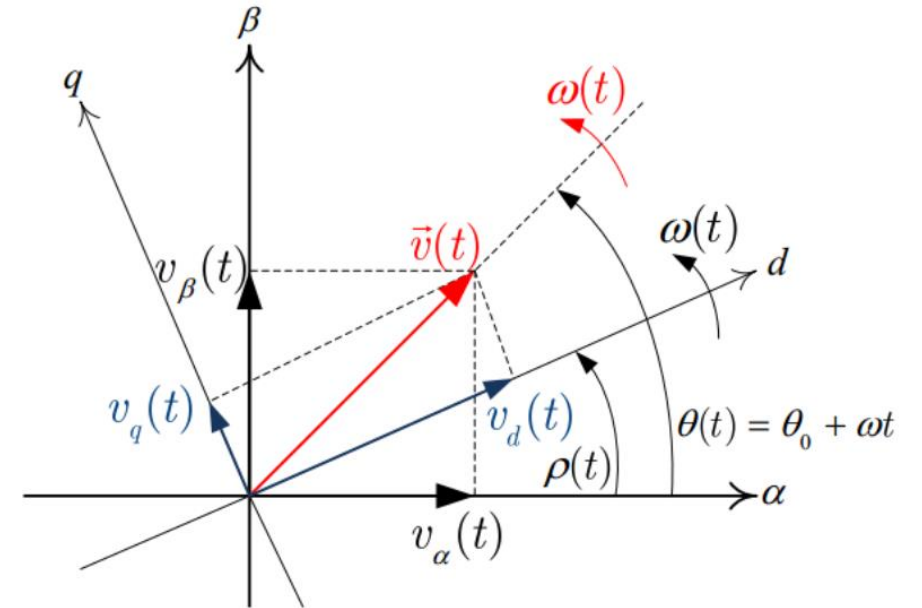
$$\rho = 0 \text{ e } \theta = 0$$

Transformação invariante em amplitude



□ Equivalente ao  $\alpha\beta \rightarrow$  eixo estacionário.

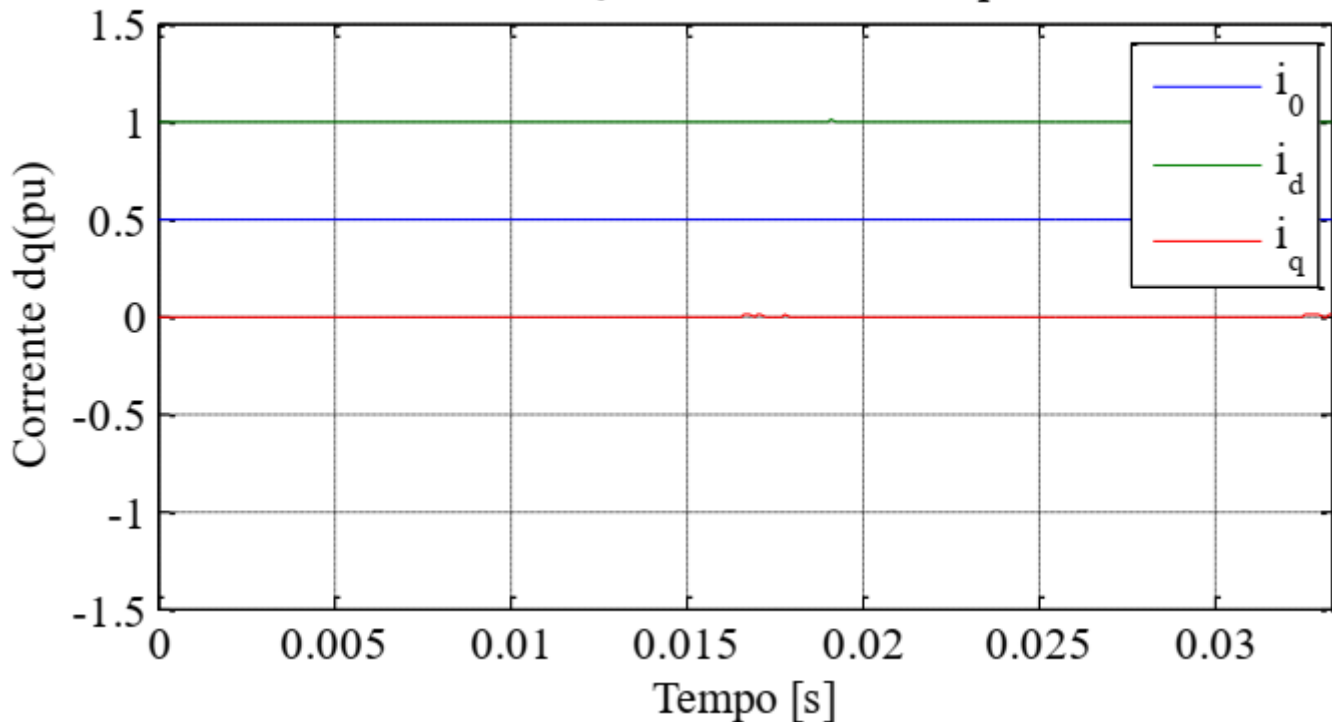
$$\begin{cases} i_a(t) = \hat{I}_a \cos(377 t + \theta) + \frac{\hat{I}_a}{2} \\ i_b(t) = \hat{I}_b \cos\left(377 t - \frac{2\pi}{3} + \theta\right) + \frac{\hat{I}_a}{2} \\ i_c(t) = \hat{I}_c \cos\left(377 t - \frac{4\pi}{3} + \theta\right) + \frac{\hat{I}_a}{2} \end{cases}$$



# Exemplo: Transformação de Park

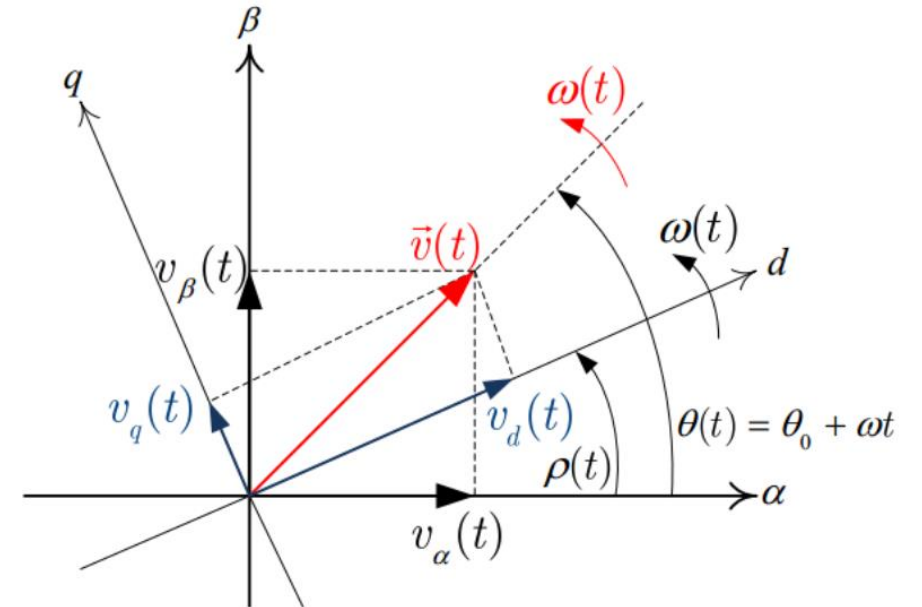
$$\rho = 377t \text{ e } \theta = 0^\circ$$

Transformação invariante em amplitude



□ Eixo síncrono.

$$\begin{cases} i_a(t) = \hat{I}_a \cos(377t + \theta) + \frac{\hat{I}_a}{2} \\ i_b(t) = \hat{I}_b \cos\left(377t - \frac{2\pi}{3} + \theta\right) + \frac{\hat{I}_a}{2} \\ i_c(t) = \hat{I}_c \cos\left(377t - \frac{4\pi}{3} + \theta\right) + \frac{\hat{I}_a}{2} \end{cases}$$

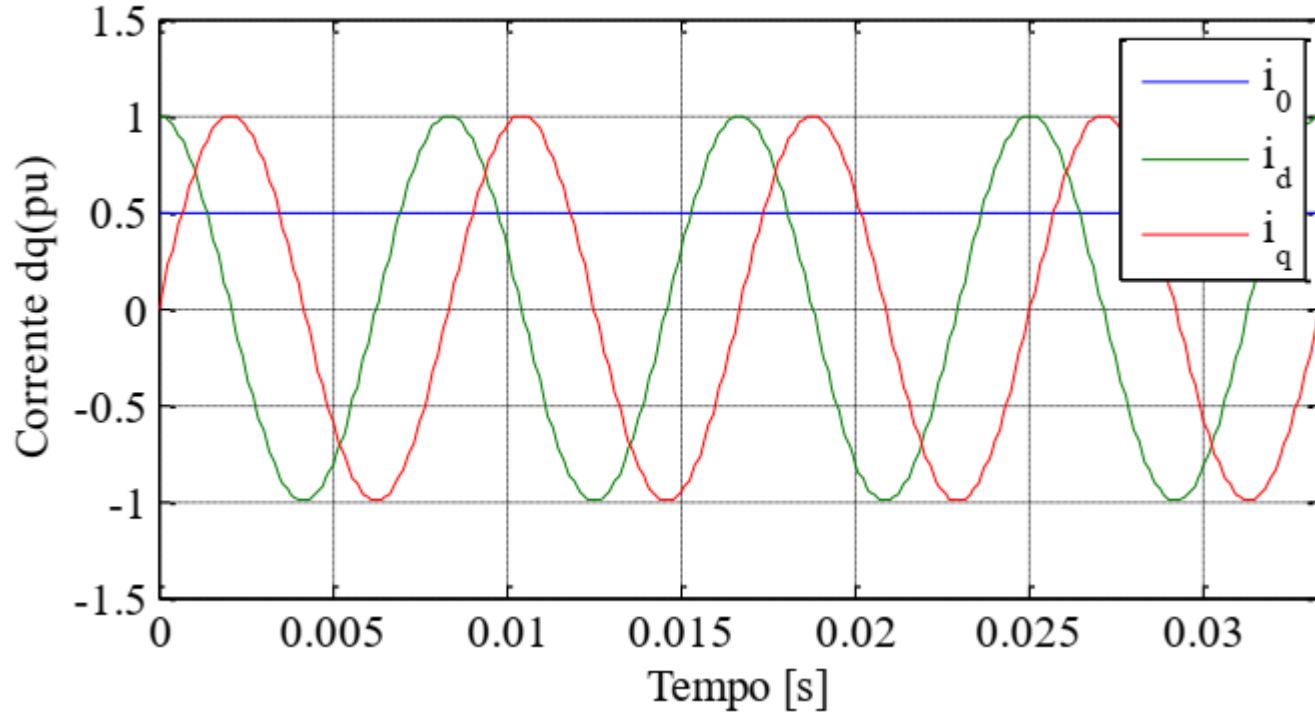




# Exemplo: Transformação de Park

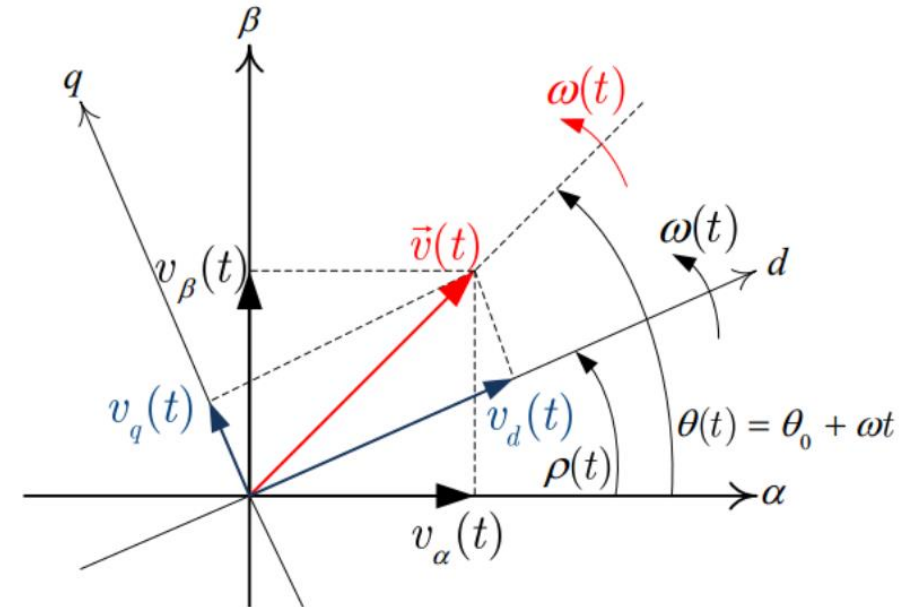
$$\rho = -377t \text{ e } \theta = 0^\circ$$

Transformação invariante em amplitude



□ Dobro da frequência fundamental!

$$\begin{cases} i_a(t) = \hat{I}_a \cos(377 t + \theta) + \frac{\hat{I}_a}{2} \\ i_b(t) = \hat{I}_b \cos\left(377 t - \frac{2\pi}{3} + \theta\right) + \frac{\hat{I}_a}{2} \\ i_c(t) = \hat{I}_c \cos\left(377 t - \frac{4\pi}{3} + \theta\right) + \frac{\hat{I}_a}{2} \end{cases}$$



# Transformação de Park e vetor espacial

$$\begin{cases} v_a(t) = \hat{V} \cos(\omega t + \theta_0) \\ v_b(t) = \hat{V} \cos\left(\omega t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_c(t) = \hat{V} \cos\left(\omega t + \theta_0 - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \begin{bmatrix} v_0 \\ v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{V} \cos(\omega t + \theta_0 - \rho) \\ \hat{V} \sin(\omega t + \theta_0 - \rho) \end{bmatrix}$$

□ Caso geral:

$$\vec{v}_{dq} = \vec{v} e^{-j\rho(t)} = \hat{V} e^{-j(\{\omega t - \rho(t)\} + \theta_0)}$$

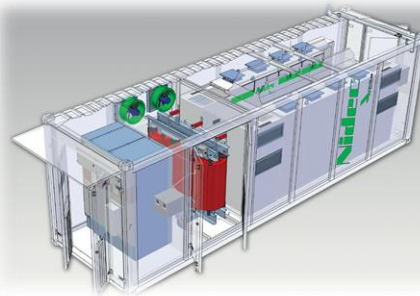
□ Se  $\rho = \omega t$ :

$$\vec{v}_{dq} = \hat{V} e^{-j(\{\omega t - \omega t\} + \theta_0)} \Rightarrow \boxed{\vec{v}_{dq} = \hat{V} e^{-j\theta_0}} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} v_d = \hat{V} \cos(\theta_0) \\ v_q = \hat{V} \sin(\theta_0) \end{cases}$$



# Expressões de potência instantânea em diferentes orientações

Prof. Allan Fagner Cupertino  
[afcupertino@ieee.org](mailto:afcupertino@ieee.org)



## Expressão da potência instantânea – coordenadas $\alpha\beta$

$$p(t) = [V_{abc}]^T [I_{abc}] \quad V_{abc} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \text{ e } I_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

□ Utilizando-se a transformação de Clarke:

$$p(t) = \left[ [T_{0\alpha\beta}]^{-1} [V_{0\alpha\beta}] \right]^T \left[ [T_{0\alpha\beta}]^{-1} I_{0\alpha\beta} \right] \Leftrightarrow [V_{0\alpha\beta}]^T \left[ [T_{0\alpha\beta}]^{-1} \right]^T [T_{0\alpha\beta}]^{-1} [I_{0\alpha\beta}]$$

$$V_{0\alpha\beta} = \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \text{ e } I_{0\alpha\beta} = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

□ Se matriz de transformação é invariante em potência:

$$p(t) = [V_{0\alpha\beta}]^T [I_{0\alpha\beta}] \Leftrightarrow \boxed{p(t) = v_0 i_0 + v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta}$$

## Expressão da potência instantânea – coordenadas $\alpha\beta$

□ Se a matriz for invariante em amplitude, deve-se calcular o produto:  $\left[ [T_{0\alpha\beta}]^{-1} \right]^T [T_{0\alpha\beta}]^{-1}$

$$\left[ [T_{0\alpha\beta}]^{-1} \right]^T [T_{0\alpha\beta}]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{2} \end{bmatrix}$$

□ Neste caso, o resultado será:

$$p(t) = [V_{0\alpha\beta}]^T \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{2} \end{bmatrix} [I_{0\alpha\beta}] \Leftrightarrow p(t) = 3 v_0 i_0 + \frac{3}{2} v_\alpha i_\alpha + \frac{3}{2} v_\beta i_\beta$$

# Expressão da potência instantânea – coordenadas $dq$

□ Transformação invariante em potência:

$$p(t) = v_0 i_0 + v_d i_d + v_q i_q$$

:

□ Transformação invariante em amplitude:

$$p(t) = 3 v_0 i_0 + \frac{3}{2} v_d i_d + \frac{3}{2} v_q i_q$$

## Fluxo de potência ativa e reativa – coordenadas naturais

$$S_{3f} = \frac{3}{2} \vec{v} \vec{i}^* = p + j q$$

$$\begin{cases} \vec{i} = \frac{2}{3} \left( i_a(t) e^{j0} + i_b(t) e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_c(t) e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) \\ \vec{v} = \frac{2}{3} \left( v_a(t) e^{j0} + v_b(t) e^{j\frac{2\pi}{3}} + v_c(t) e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) \end{cases}$$

$$S_{3f} = (v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c) + j \frac{1}{\sqrt{3}} [(v_a - v_b) i_c + (v_b - v_c) i_a + (v_c - v_a) i_b]$$

# Fluxo de potência ativa e reativa – coordenadas estacionárias

$$S_{3f} = \frac{3}{2} \vec{v} \vec{i}^* = p + j q$$

$$\begin{cases} \vec{i} = i_\alpha + j i_\beta \\ \vec{v} = v_\alpha + j v_\beta \end{cases}$$



$$\begin{cases} p = \frac{3}{2} (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) \\ q = \frac{3}{2} (v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) \end{cases}$$

$$S_{3f} = \frac{3}{2} \vec{v} \vec{i}^* = p + j q$$

$$\begin{cases} \vec{i} = i_d + j i_q \\ \vec{v} = v_d + j v_q \end{cases}$$



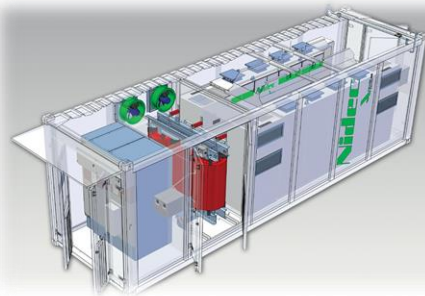
$$\begin{cases} p = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \\ q = \frac{3}{2} (v_q i_d - v_d i_q) \end{cases}$$





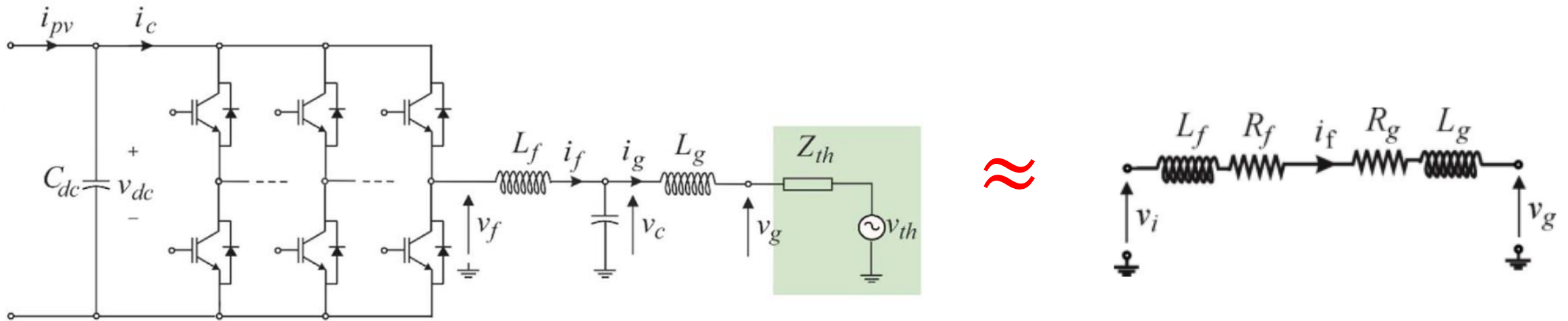
# Modelo dinâmico do inversor

Prof. Allan Fagner Cupertino  
[afcupertino@ieee.org](mailto:afcupertino@ieee.org)



# Modelo dinâmico do inversor - considerações

- ❑ Dinâmica média das correntes de saída;
- ❑ Neste caso, despreza-se o efeito dos harmônicos de comutação;
- ❑ Coerente com o princípio de funcionamento do modulador PWM;
- ❑ Princípio: inversor sintetiza uma tensão de saída que força a circulação de uma corrente!



Fonte: C. C. Gomes, A. F. Cupertino e H. A. Pereira, “Damping techniques for grid-connected voltage source converters based on LCL filter: An overview”, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018.

## Modelo dinâmico do inversor – coordenadas naturais

$$\begin{cases} v_{ia}(t) - (R_f + R_g) i_a(t) - (L_f + L_g) \frac{di_a(t)}{dt} - v_{ga}(t) = 0 \\ v_{ib}(t) - (R_f + R_g) i_b(t) - (L_f + L_g) \frac{di_b(t)}{dt} - v_{gb}(t) = 0 \\ v_{ic}(t) - (R_f + R_g) i_c(t) - (L_f + L_g) \frac{di_c(t)}{dt} - v_{gc}(t) = 0 \end{cases}$$

□ 3 equações diferenciais. Grandezas senoidais.

□ Utilizando a teoria de vetores espaciais:

$$\vec{v}_i - R \vec{i} - L \frac{d\vec{i}}{dt} - \vec{V}_g = 0$$

$$\begin{aligned} R &= R_f + R_g \\ L &= L_f + L_g \end{aligned}$$

# Modelo dinâmico do inversor – transformação de Clarke

$$\vec{X} = \vec{X}_{\alpha\beta} = X_{\alpha} + j X_{\beta}$$

$$\vec{v}_i - R \vec{i} - L \frac{d\vec{i}}{dt} - \vec{V}_g = 0 \quad \rightarrow \quad \vec{v}_{i,\alpha\beta} - R \vec{i}_{\alpha\beta} - L \frac{d\vec{i}_{\alpha\beta}}{dt} - \vec{v}_{g,\alpha\beta} = 0$$

$$\begin{cases} v_{i\alpha}(t) - Ri_{\alpha}(t) - L \frac{di_{\alpha}(t)}{dt} - v_{g\alpha}(t) = 0 \\ v_{i\beta}(t) - Ri_{\beta}(t) - L \frac{di_{\beta}(t)}{dt} - v_{g\beta}(t) = 0 \end{cases}$$

## Modelo dinâmico do inversor – transformação de Park

$$\vec{v}_{i,\alpha\beta} - R \vec{i}_{\alpha\beta} - L \frac{d\vec{i}_{\alpha\beta}}{dt} - \vec{v}_{g,\alpha\beta} = 0 \quad \times \quad e^{-j\rho} e^{j\rho}$$

$$\vec{v}_{i,\alpha\beta} e^{-j\rho} e^{j\rho} - R \vec{i}_{\alpha\beta} e^{-j\rho} e^{j\rho} - L \frac{d}{dt} (\vec{i}_{\alpha\beta} e^{-j\rho} e^{j\rho}) - \vec{v}_{g,\alpha\beta} e^{-j\rho} e^{j\rho} = 0$$

□ Notando que  $\vec{X}_{\alpha\beta} e^{-j\rho} = \vec{X}_{dq}$ , pode-se obter que

$$\vec{v}_{i,dq} e^{j\rho} - R \vec{i}_{dq} e^{j\rho} - L \frac{d}{dt} (\vec{i}_{dq} e^{j\rho}) - \vec{v}_{g,dq} e^{j\rho} = 0$$

$$\vec{v}_{g,dq} = v_{g,d} + j v_{g,q} \quad \vec{i}_{dq} = i_d + j i_q \quad \vec{v}_{i,dq} = v_{i,d} + j v_{i,q}$$

## Modelo dinâmico do inversor – transformação de Park

$$\vec{v}_{i,dq} e^{j\rho} - R \vec{i}_{dq} e^{j\rho} - L \frac{d}{dt} (\vec{i}_{dq} e^{j\rho}) - \vec{v}_{g,dq} e^{j\rho} = 0$$

$$\vec{v}_{i,dq} e^{j\rho} - R \vec{i}_{dq} e^{j\rho} - L \frac{d\vec{i}_{dq}}{dt} e^{j\rho} - j L \vec{i}_{dq} \frac{d\rho}{dt} e^{j\rho} - \vec{v}_{g,dq} e^{j\rho} = 0$$

□ Separando em parte real e imaginária:

$$\begin{cases} v_{i,d} - R i_d - L \frac{di_d}{dt} + L i_q \frac{d\rho}{dt} - v_{g,d} = 0 \\ v_{i,q} - R i_q - L \frac{di_q}{dt} - L i_d \frac{d\rho}{dt} - v_{g,q} = 0. \end{cases}$$

## Conclusões importantes

$$\begin{cases} v_{i,d} - R i_d - L \frac{di_d}{dt} + L i_q \frac{d\rho}{dt} - v_{g,d} = 0 \\ v_{i,q} - R i_q - L \frac{di_q}{dt} - L i_d \frac{d\rho}{dt} - v_{g,q} = 0. \end{cases}$$

- ❑ Se  $\rho = \omega t$ , as correntes vão se tornar variáveis CC. Isso permite a utilização de controladores proporcional integral;
- ❑ Existe um acoplamento entre as dinâmicas de eixo direto e eixo de quadratura;
- ❑ Esta é a relação dinâmica entre a tensão sintetizada pelo inversor e a corrente;
- ❑ Perguntas:
  - Como garantir  $\rho = \omega t$ ?
  - Como realizar o controle de corrente do inversor?

# Obrigado pela Atenção



Bons estudos!



Dúvidas: [afcupertino@ieee.org](mailto:afcupertino@ieee.org)



[www.gesep.ufv.br](http://www.gesep.ufv.br)



@GESEP



@gesep\_vicosa



Gesep



Pesquise por:  
“GESEP UFV”



EStimate - Sistemas  
Fotovoltaicos



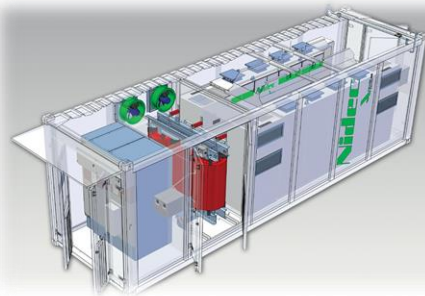
Pesquise por:  
“EStimate”





# PLL – Malha de sincronismo de fase

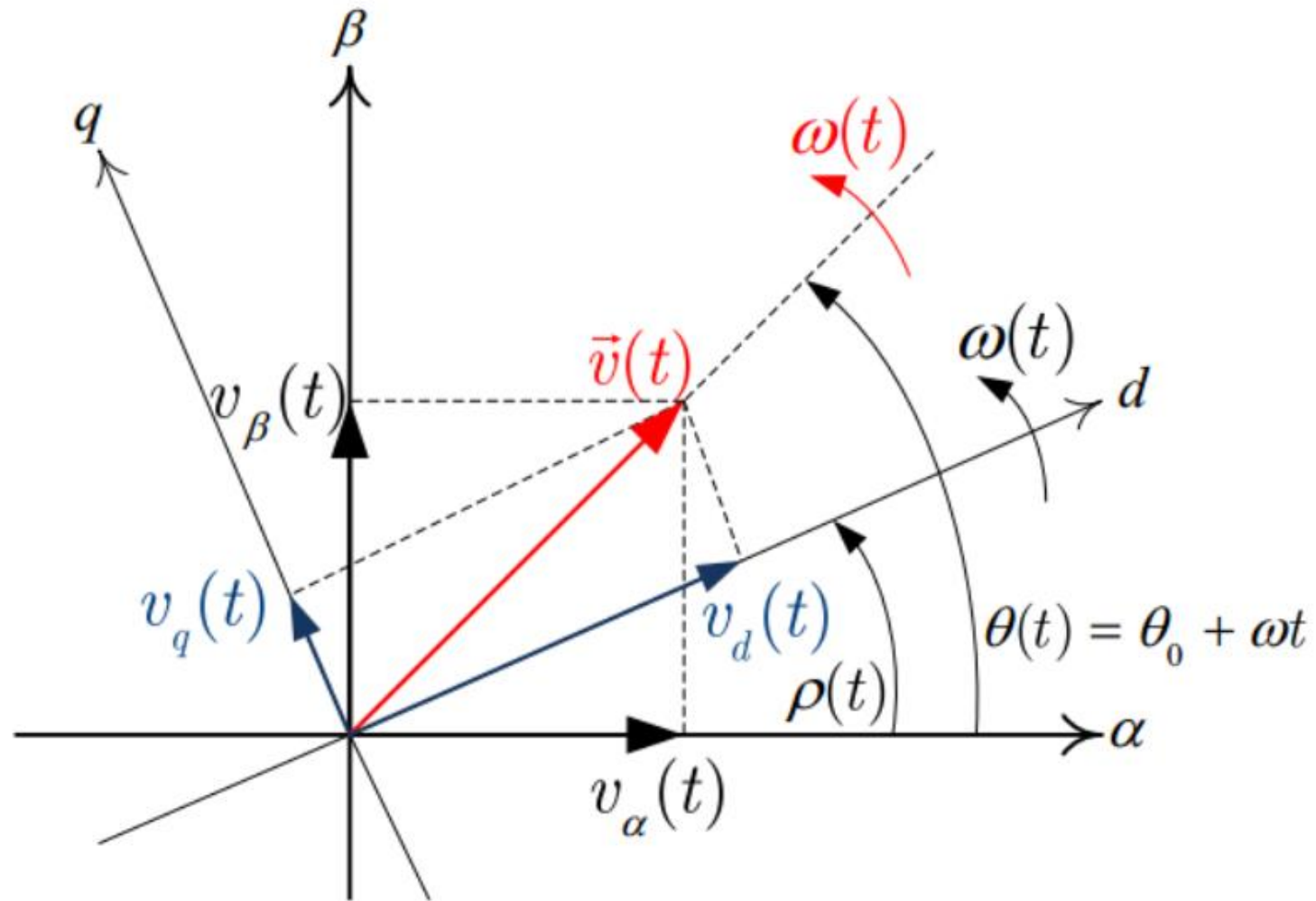
Prof. Allan Fagner Cupertino  
[afcupertino@ieee.org](mailto:afcupertino@ieee.org)



# PLL – Phase locked loop

- ❑ **Uma** das técnicas possíveis para rastrear o ângulo da rede elétrica;
  
- ❑ Características de uma boa PLL:
  - Deve ser suficientemente rápida;
  - Deve ser estável;
  - Robustez perante variações na tensão e frequência da rede;
  - Robusta perante distorção harmônica;
  - Robustez perante offset de medição.
  
- ❑ Vamos discutir a SRF-PLL → Synchronous reference frame PLL;
  
- ❑ Apresenta diversas desvantagens mas é bastante simples!

# Princípio de funcionamento – SRF-PLL



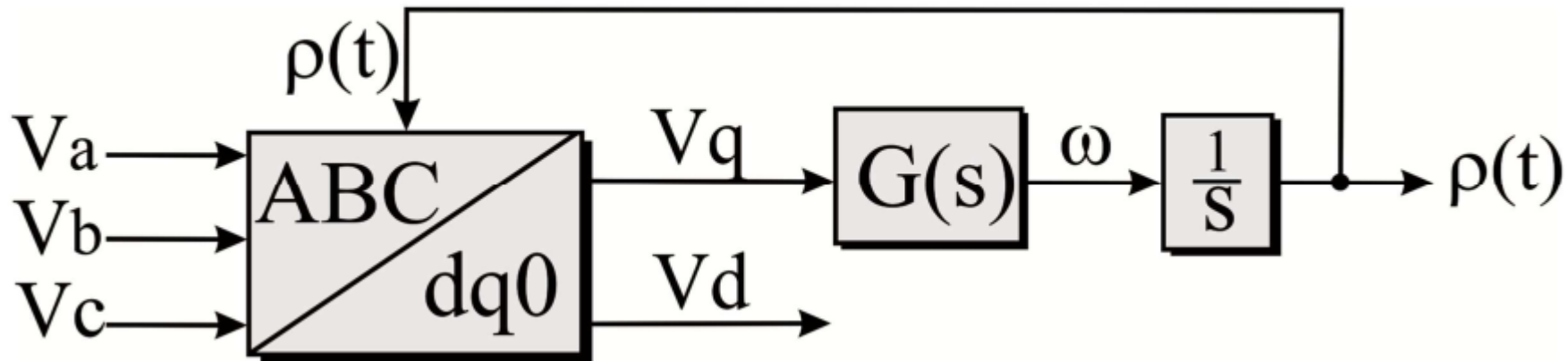
□ Baseia-se no conceito de anular uma das componentes da tensão.

## Princípio de funcionamento – SRF-PLL

$$\begin{cases} V_d = \hat{V} \cos(\omega_n t + \theta_0 - \rho(t)) \\ V_q = \hat{V} \sin(\omega_n t + \theta_0 - \rho(t)) \end{cases}$$

$$V_d = \hat{V} \text{ e } V_q = 0 \\ \text{quando } \rho(t) = \omega_n t + \theta_0$$

- Projeta-se um controlador para anular a componente de quadratura da tensão.



- Como projetar o controlador  $G(s)$ ?

# Obrigado pela Atenção



Bons estudos!



Dúvidas: [afcupertino@ieee.org](mailto:afcupertino@ieee.org)



[www.gesep.ufv.br](http://www.gesep.ufv.br)



@GESEP



@gesep\_vicosa



Gesep



Pesquise por:  
“GESEP UFV”



EStimate - Sistemas  
Fotovoltaicos

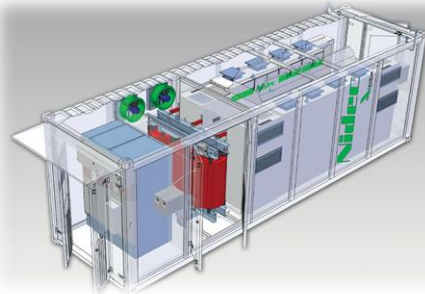


Pesquise por:  
“EStimate”



# Controle de corrente do inversor

Prof. Allan Fagner Cupertino  
[afcupertino@ieee.org](mailto:afcupertino@ieee.org)



# Obrigado pela Atenção



Bons estudos!



Dúvidas: [afcupertino@ieee.org](mailto:afcupertino@ieee.org)



[www.gesep.ufv.br](http://www.gesep.ufv.br)



@GESEP



@gesep\_vicosa



Gesep



Pesquise por:  
“GESEP UFV”



ES  
Estimate - Sistemas  
Fotovoltaicos



Pesquise por:  
“Estimate”