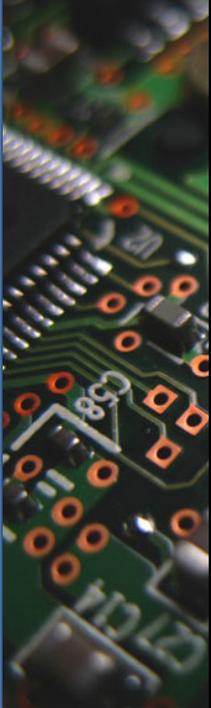




UFMG

## Parte VI: Inversores conectados à rede




GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG




GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

### Visão Geral sobre o tema do segundo projeto

- **Conexão de conversores à rede elétrica**
  - **IEEE 519** - Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems;
  - **IEC 1000-3-2/EN 61000-3-2** - Normas de EMI para Equipamentos de I<16A por fase;
  - **CISPR 11:2019** - Limites de EMI para equipamentos médicos, científicos e industriais;
  - **IEEE 1547** - Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces

2



## Visão Geral sobre o tema do segundo projeto

- **Definições de EMI – CISPR 11**
  - Grupo 1 – Todos os equipamentos no escopo da norma que não são classificados como grupo 2;
  - Grupo 2 – Todos os equipamentos no escopo da norma que o sinal de RF é intencionalmente gerada e utilizada;
  - Classes:
 

*Equipamentos classe A* são os equipamentos adequados para utilização em todos os locais que não sejam aqueles localizados em ambientes residenciais e aqueles diretamente conectados à rede de alimentação elétrica de baixa tensão que alimenta os edifícios utilizados com finalidade de moradia (domésticos).

*Equipamentos classe B* são os equipamentos adequados para utilização em locais no ambiente residencial e em estabelecimentos conectados diretamente à rede de alimentação elétrica de baixa tensão que alimenta os edifícios utilizados com finalidade de moradia.

3



## Visão Geral sobre o tema do segundo projeto

- **Definições de EMI – CISPR 11**

Grupo 1

*Equipamentos do grupo 1:* o grupo 1 contém todos os equipamentos do escopo desta Norma que não são classificados como equipamentos do grupo 2.

**Geral:**

  - Equipamentos laboratoriais
  - Equipamentos eletromédicos
  - Equipamentos científicos
  - Semicondutores-conversores
  - Equipamentos industriais de eletroaquecimento com frequências de operação menores ou iguais a 9 KHz
  - Ferramentas de máquina
  - Equipamentos de controle e medição de processo industrial
  - Equipamentos de fabricação de semicondutores

**Detalhado:**

Geradores de sinal, receptores de medição, contadores de frequência, medidores de fluxo, analisadores de espectro, máquinas de pesagem, máquinas para análise química, microscópios eletrônicos, fontes de alimentação de modo alternado e conversores semicondutores (quando não estiverem incorporados a um equipamento), retificadores/inversores semicondutores, conversor de energia conectado em rede (CCPC), equipamentos de aquecimento resistivos com controladores de potência de C.A. com semicondutores integrados, fornos a arco e fornos para fundição de metal, aquecedores de plasma e descarga luminescente, equipamento para diagnóstico por raios X, equipamento de tomografia computadorizada, equipamento de monitoração do paciente, equipamento de diagnóstico e terapia por ultrassom, máquinas de lavagem por ultrassom, controles reguladores e equipamentos com controles reguladores que incorporam dispositivos semicondutores com uma corrente de entrada declarada acima de 25 A por fase

4



## Visão Geral sobre o tema do segundo projeto

- **Definições de EMI – CISPR 11**

**Grupo 2**

*Equipamentos do grupo 2:* o grupo 2 contém todos os equipamentos ISM de RF nos quais a energia de radiofrequência na faixa de frequências de 9 kHz a 400 GHz é intencionalmente gerada e utilizada, ou apenas utilizada localmente, sob a forma de radiação eletromagnética, acoplamento indutivo e/ou capacitivo, para o tratamento de material, para a finalidade de análise/inspeção, ou para transferência de energia eletromagnética.

**Geral:**

- Aparelho de micro-ondas para irradiação de UV
- Aparelhos de iluminação por micro-ondas
- Equipamentos industriais de aquecimento por indução operando acima de 9 kHz
- Equipamentos de carregamento/transferência de energia indutiva<sup>a</sup>
- Equipamentos de aquecimento dielétrico
- Equipamentos de aquecimento por micro-ondas industriais

**Formos de micro-ondas**

- Equipamentos eletromédicos
- Equipamentos de soldagem elétrica
- Equipamento de erosão por centelhamento ou eletroerosão (EEC)

**Modelos de demonstração para educação e treinamento**

<sup>a</sup> Aparelhagem de transferência de potência indutiva ou capacitiva normalmente sujeitos a ABNT NBR IEC/CISPR 11, mas que fazem parte do equipamento sujeito a outras Normas CISPR, estão excluídos do âmbito de aplicação da ABNT NBR IEC/CISPR 11.

**Detalhado:**

- Fundição de metal, aquecimento de tarugo, aquecimento de componentes, soldagem e aplicação de bronze, soldagem em arco, soldagem em arco tipo *stud*, soldagem por resistência, soldagem por pontos, soldagem com arame tubular, oscilador de laser industrial excitado com descarga de alta frequência, colagem de madeira, solda plástica, preaquecimento plástico, processamento de alimentos, assar biscoitos, descongelamento de alimentos, secagem de papel, tratamento têxtil, cura de adesivos, preaquecimento de materiais, equipamento de diatermia por ondas curtas, equipamento de terapia por micro-ondas, imagem por ressonância magnética (MRI), esterilizadores médicos de AF, equipamentos cirúrgicos de alta frequência (AF), refino por zona de cristais, modelos de demonstração dos transformadores Tesla de alta-tensão, geradores de corral etc.

5



## Visão Geral sobre o tema do segundo projeto

**Tabela 2 – Limites da tensão de perturbação para equipamentos classe A, grupo 1, medidos no local de ensaio (porta de energia elétrica c.a.)**

| Faixa de frequências MHz | Potência nominal $\leq 20$ kVA <sup>a</sup> |                    | Potência nominal $> 20$ kVA e $\leq 75$ kVA <sup>a, b</sup> |                    | Equipamentos e Sistemas Eletrônicos de alta potência, potência nominal $> 75$ kVA <sup>a, c</sup> |                    |
|--------------------------|---|--------------------|---|--------------------|---|--------------------|
|                          | Quase pico dB( $\mu$ V)                     | Médio dB( $\mu$ V) | Quase pico dB( $\mu$ V)                                     | Médio dB( $\mu$ V) | Quase pico dB( $\mu$ V)   | Médio dB( $\mu$ V) |
| 0,15 – 0,50              | 79  | 66                 | 100   | 90                 | 130   | 120                |
| 0,50 – 5                 | 73  | 60                 | 86  | 76                 | 125   | 115                |
| 5 – 30                   | 73  | 60                 | Decrescendo linearmente com o logaritmo da frequência para  |                    | 115   | 105                |
|                          |   |                    | 90  | 80                 |   |                    |
|                          |   |                    | 73  | 60                 |   |                    |

Na frequência de transição, devem ser aplicados os limites mais rigorosos.

Para os equipamentos classe A, destinados a serem conectados apenas a redes de distribuição elétrica industriais neutras isoladas ou aterradas de alta impedância (TI) (ver IEC 60364-1), os limites definidos para os equipamentos com uma potência nominal  $> 75$  kVA podem ser aplicados, independentemente da potência nominal real.

NOTA – A potência de entrada ou saída nominal de 20 kVA corresponde, por exemplo, à corrente de aproximadamente 29 A por fase no caso de rede de alimentação trifásica de 400 V, e para corrente de aproximadamente 58 A, por fase no caso de rede de alimentação trifásica de 200 V.

<sup>a</sup> Estes limites são aplicáveis aos equipamentos com uma potência de entrada nominal  $> 20$  kVA e destinados a serem conectados a um transformador de potência ou um gerador dedicado, e que não estejam conectados a linhas de transmissão aéreas de baixa tensão (BT). Para equipamentos não destinados a serem conectados a um transformador de potência específico do usuário, são aplicáveis os limites para  $\leq 20$ . O fabricante e/ou fornecedor devem fornecer informações sobre as medidas que podem ser empregadas na instalação para reduzir emissões do equipamento instalado. Em particular, eles devem indicar que este equipamento é destinado a ser conectado a um transformador de potência ou um gerador dedicado e não às linhas de transmissão aéreas de BT.

<sup>b</sup> Estes limites são aplicáveis aos equipamentos e sistemas eletrônicos de alta potência com potência nominal maior que 75 kVA, quando destinados a serem instalados conforme a seguir:

- instalação é alimentada a partir de um transformador ou gerador de energia, o qual não é conectado às linhas de transmissão aéreas de baixa tensão (BT).
- instalação é fisicamente separada do ambiente residencial por uma distância maior que 30 m ou por uma estrutura que atua como barreira para os fenômenos radiados.
- o fabricante e/ou fornecedor deve indicar que o equipamento atende aos limites de perturbações de tensão para equipamentos e sistemas eletrônicos de alta potência de entrada  $> 75$  kVA e fornecer informações para a instalação a serem aplicadas pelo instalador. Particularmente, deve ser indicado que este equipamento é destinado para ser utilizado em uma instalação que seja alimentada por um transformador ou gerador e não por linhas de transmissão aéreas de BT.

<sup>c</sup> A seleção dos limites apropriados deve ser baseada na potência c.a. nominal declarada pelo fabricante.

6



## Visão Geral sobre o tema do segundo projeto

**Tabela 3 – Limites para perturbações conduzidas de equipamentos classe A, grupo 1, medidos no local de ensaio (porta de energia elétrica c.c.)**

| Faixa de frequências<br>MHz | Potência nominal<br>≤ 20 kVA <sup>a</sup> |         | Potência nominal<br>> 20 kVA e ≤ 75 kVA <sup>a, b</sup> |          |                     |         | Potência nominal<br>> 75 kVA <sup>a, b</sup> |           |                     |         |
|-----------------------------|---|---------|---|----------|---------------------|---------|--|-----------|---------------------|---------|
|                             | Limites de tensão                         |         | Limites de tensão                                       |          | Limites de corrente |         | Limites de tensão                            |           | Limites de corrente |         |
|                             | QP  | MÉDIO   | QP  | MÉDIO    | QP                  | MÉDIO   | QP   | MÉDIO     | QP                  | MÉDIO   |
|                             | dB(μV)                                    | dB(μV)  | dB(μV)  | dB(μV)   | dB(μA)              | dB(μA)  | dB(μV)                                       | dB(μV)    | dB(μA)              | dB(μA)  |
| 0,15 à 5                    | 97 à 89                                   | 84 à 76 | 116 à 106   | 106 à 96 | 72 à 62             | 62 à 52 | 132 à 122                                    | 122 à 112 | 88 à 78             | 78 à 68 |
| 5 à 30                      | 89  | 76      | 106 à 89  | 96 à 76  | 62 à 45             | 52 à 32 | 122 à 105                                    | 112 à 92  | 78 à 61             | 68 à 48 |

Em certas faixas de frequência, o limite da tabela diminui linearmente com o logaritmo da frequência.

<sup>a</sup> A seleção dos limites apropriados deve ser baseada na potência c.a. nominal declarada pelo fabricante.

<sup>b</sup> Estes limites são aplicáveis aos equipamentos com potência nominal > 20 kVA e destinados a serem instalados em um grande sistema de geração de energia fotovoltaica por um profissional. No manual que acompanha o produto, o fabricante e/ou fornecedor deve fornecer informações de mitigações que podem ser utilizadas para reduzir a emissão do equipamento instalado, com o objetivo de prevenir interferência prejudicial para recepção de rádio em uma distância de 30 m a partir da instalação. Particularmente, deve ser indicado que este equipamento pode ser equipado com filtragem adicional e que a instalação é fisicamente separada do ambiente residencial por uma distância maior que 30 m. É recomendado que o instalador verifique a mitigação da instalação em relação à ABNT NBR IEC/CISPR 11 com medição *in situ* conforme indicado em 6.4 desta Norma.



## Visão Geral sobre o tema do segundo projeto

**Tabela 4 – Limites da tensão de perturbação para equipamentos classe B, grupo 1, medidos no local de ensaio (porta de energia elétrica c.a.)**

| Faixa de frequências<br>MHz | Quase pico<br>dB(μV)  | Médio<br>dB(μV)   |
|-----------------------------|---|---|
| 0,15 – 0,50                 | 66<br>Decrescendo linearmente com o logaritmo da frequência para 56 | 56<br>Decrescendo linearmente com o logaritmo da frequência para 46 |
| 0,50 – 5                    | 56  | 46  |
| 5 – 30                      | 60  | 50  |

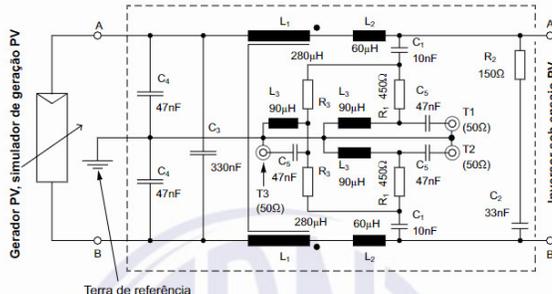
Na frequência de transição, devem ser aplicados os limites mais rigorosos.

**Tabela 5 – Limites da tensão de perturbação para equipamentos classe B, grupo 1, medidos no local de ensaio (porta de alimentação c.c.)**

| Faixa de frequências<br>MHz | Quase pico<br>dB(μV)  | Médio<br>dB(μV)   |
|-----------------------------|---|---|
| 0,15 – 0,50                 | 84<br>Decrescendo linearmente com o logaritmo da frequência para 74 | 74<br>Decrescendo linearmente com o logaritmo da frequência para 64 |
| 0,50 – 30                   | 74  | 64  |



### Visão Geral sobre o tema do segundo projeto



Terra de referência

DC-AN com  $Z_{CM} = 150 \Omega$ ,  $Z_{CM} = 100 \Omega$ . T1, T2 e T3 todos terminados com 50  $\Omega$ .  
 Sinais de tensão assimétricos (-20 dB) disponível para T1 e T2.  
 Sinal de tensão em modo comum (-20 dB ... -24 dB dependendo do  $R_3$ ) disponível para T3.  
 $900 \Omega < R_3 < 1500 \Omega$  dependendo das perdas dos elementos reativos do circuito para casar com tolerância da impedância exigida em toda a faixa de frequência.

NOTA A medição da porta T3 pode ser utilizada para a medição de componentes de perturbação de modo assimétrico ou comum (CM).

9



### Visão Geral sobre o tema do segundo projeto

- Definições IEEE 519 – Distorção Harmônica

**Tab. 2:** Maximum admissible current harmonics  $I_n^*$  (odd and even) and TDD in % of  $I_L$  according to IEEE 519 for distribution system voltages  $U_{MV} = [0.12, 161] \text{ kV}$ .  $I_{SC}$  is the short-circuit current at the PCC,  
 $I_{SC} = \frac{U_{MV}}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot 50 \text{ Hz} \cdot L_{SC}}$ .

| Maximum harmonic current distortion $I_n^*$ and TDD in % of $I_L$ for distribution systems 0.12-69 kV |      |                    |                    |                    |               |      |
|---|------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|------|
| Individual harmonic order $\nu$ (odd harmonics) <sup>1)</sup>   |      |                    |                    |                    |               |      |
| $I_{SC}/I_L$  | < 11 | $11 \leq \nu < 17$ | $17 \leq \nu < 23$ | $23 \leq \nu < 35$ | $35 \leq \nu$ | TDD  |
| $\leq 20$ <sup>2)</sup>   | 4.0  | 2.0                | 1.5                | 0.6                | 0.3           | 5.0  |
| (20, 50]  | 7.0  | 3.5                | 2.5                | 1.0                | 0.5           | 8.0  |
| (50, 100]   | 10.0 | 4.5                | 4.0                | 1.5                | 0.7           | 12.0 |
| (100, 1000]   | 12.0 | 5.5                | 5.0                | 2.0                | 1.0           | 15.0 |
| > 1000  | 15.0 | 7.0                | 6.0                | 2.5                | 1.4           | 20.0 |

<sup>1)</sup> Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits.  
<sup>2)</sup> All power generation equipment is limited to these values of current distortion regardless of  $I_{SC}/I_L$ .  
 For distribution systems in the voltage range 69-161 kV the above limits reduced by 50% apply.

10



## Visão Geral sobre o tema do segundo projeto

- Definições IEEE 1547
  - A recomendação IEEE 1547 trata da conexão de geradores distribuídos à rede elétrica;
  - Ela versa sobre:
    - Condições anormais de operação e requisitos de *ride-through* e de *trip*;
    - Limites de distorção harmônica;
    - Limites de sobre-tensão;
    - Condições de energização das linhas alimentadoras;
    - Detecção de ilhamento e técnicas de anti-ilhamento;
    - Operação ilhada;
    - Modos de operação frente a controle de tensão, frequência, potência ativa e reativa;
  - A análise detalhada da norma não é do escopo desta disciplina;
  - A seguir serão listadas algumas das recomendações;

11



## Visão Geral sobre o tema do segundo projeto

- Definições IEEE 1547 - Classificação
  - For categories related to reactive power capability and voltage regulation performance requirements (Clause 5):
    - Category A covers minimum performance capabilities needed for Area EPS voltage regulation and are reasonably attainable by all DER technologies as of the publication of this standard. This level of performance is deemed adequate for applications where the DER penetration in the distribution system is lower,<sup>12</sup> and where the overall DER power output is not subject to frequent large variations.
    - Category B covers all requirements within Category A and specifies supplemental capabilities needed to adequately integrate DERs in local Area EPSs where the aggregated DER penetration is higher or where the overall DER power output is subject to frequent large variations.
  - For categories related to response to Area EPS abnormal conditions (Clause 6):
    - *Abnormal operating performance Category I* is based on essential *bulk power system* (BPS) stability/reliability needs and reasonably attainable by all DER technologies that are in common usage today.
    - *Abnormal operating performance Category II* covers all BPS stability/reliability needs and is coordinated with existing reliability standards<sup>13</sup> to avoid tripping for a wider range of disturbances of concern to BPS stability.<sup>14</sup>
    - *Abnormal operating performance Category III* is based on both BPS stability/reliability and distribution system reliability/power quality needs and is coordinated with existing interconnection requirements for very high DER penetration.<sup>15</sup>

12



## Visão Geral sobre o tema do segundo projeto

- Definições IEEE 1547 – Condições normais de operação

**4.10.2 Enter service criteria**

When entering service, the DER shall not energize the Area EPS until the *applicable voltage* and system frequency are within the ranges specified in Table 4 and the permit service setting is set to “Enabled”.<sup>40</sup>

**Table 4—Enter service criteria for DER of Category I, Category II, and Category III**

| Enter service criteria          |               | Default settings          | Ranges of allowable settings |
|---------------------------------|---------------|---------------------------|------------------------------|
| Permit service                  |               | Enabled                   | Enabled/Disabled             |
| Applicable voltage within range | Minimum value | ≥ 0.917 p.u. <sup>a</sup> | 0.88 p.u. to 0.95 p.u.       |
|                                 | Maximum value | ≤ 1.05 p.u.               | 1.05 p.u. to 1.06 p.u.       |
| Frequency within range          | Minimum value | ≥ 59.5 Hz                 | 59.0 Hz to 59.9 Hz           |
|                                 | Maximum value | ≤ 60.1 Hz                 | 60.1 Hz to 61.0 Hz           |

<sup>a</sup>This corresponds to the Range B of ANSI C84.1, Table 1, column for service voltage of 120–600 V.

- Conexão só pode ocorrer se os limites da Tab 4 se manterem por um período de 0-600s, default 300s;
- No momento da conexão o DER deve estar sincronizado com a rede, dentro dos seguintes limites

**Table 5—Synchronization parameter limits for synchronous interconnection to an EPS, or an energized Local EPS to an energized Area EPS**

| Aggregate rating of DER units (kVA) | Frequency difference (Δf, Hz) | Voltage difference (ΔV, %) | Phase angle difference (Δθ, °) |
|-------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0–500                               | 0.3                           | 10                         | 20                             |
| > 500–1 500                         | 0.2                           | 5                          | 15                             |
| > 1 500                             | 0.1                           | 3                          | 10                             |

13



## Visão Geral sobre o tema do segundo projeto

- Definições IEEE 1547 – Distorsão Harmônica

**Table 26—Maximum odd harmonic current distortion in percent of rated current ( $I_{rated}$ )<sup>a</sup>**

| Individual odd harmonic order $h$ | $h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $35 \leq h < 50$ <sup>100</sup> | Total rated current distortion (TRD) |
|-----------------------------------|----------|------------------|------------------|------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| Percent (%)                       | 4.0      | 2.0              | 1.5              | 0.6              | 0.3                             | 5.0                                  |

<sup>a</sup> $I_{rated}$  = the DER unit rated current capacity (transformed to the RPA when a transformer exists between the DER unit and the RPA).

**Table 27—Maximum even harmonic current distortion in percent of rated current ( $I_{rated}$ )<sup>a</sup>**

| Individual even harmonic order $h$ | $h = 2$ | $h = 4$ | $h = 6$ | $8 \leq h < 50$                        |
|------------------------------------|---------|---------|---------|--|
| Percent (%)                        | 1.0     | 2.0     | 3.0     | Associated range specified in Table 26 |

<sup>a</sup> $I_{rated}$  = the DER unit rated current capacity (transformed to the RPA when a transformer exists between the DER unit and the RPA).

$$\%TRD = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_1^2}}{I_{rated}} \times 100\%$$

14



## Visão Geral sobre o tema do segundo projeto

### Definições IEEE 1547 – Funções previstas

Table 6—Voltage and reactive/active power control function requirements for DER normal operating performance categories

| DER category  | Category A   | Category B |
|---|--------------|------------|
| <b>Voltage regulation by reactive power control</b> |              |            |
| Constant power factor mode                          | Mandatory    | Mandatory  |
| Voltage—reactive power mode <sup>a</sup>            | Mandatory    | Mandatory  |
| Active power—reactive power mode <sup>b</sup>       | Not required | Mandatory  |
| Constant reactive power mode                        | Mandatory    | Mandatory  |
| <b>Voltage and active power control</b>             |              |            |
| Voltage—active power (volt-watt) mode               | Not required | Mandatory  |

<sup>a</sup>Voltage-reactive power mode may also be commonly referred to as “volt-var” mode.  
<sup>b</sup>Active power-reactive power mode may be commonly referred to as “watt-var” mode.

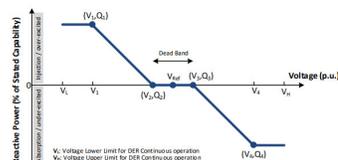


Figure H.4—Example voltage-reactive power characteristic

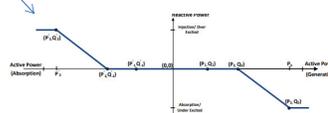


Figure H.5—Example active power-reactive power characteristic

Table 7—Minimum reactive power injection and absorption capability

| Category  | Injection capability as % of nameplate apparent power (kVA) rating | Absorption capability as % of nameplate apparent power (kVA) rating |
|---|--|---|
| A<br>(at DER rated voltage)                       | 44   | 25  |
| B<br>(over the full extent of ANSI C84.1 range A) | 44   | 44  |

15



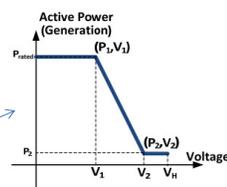
## Visão Geral sobre o tema do segundo projeto

### Definições IEEE 1547 – Funções previstas

Table 6—Voltage and reactive/active power control function requirements for DER normal operating performance categories

| DER category  | Category A   | Category B |
|---|--------------|------------|
| <b>Voltage regulation by reactive power control</b> |              |            |
| Constant power factor mode                          | Mandatory    | Mandatory  |
| Voltage—reactive power mode <sup>a</sup>            | Mandatory    | Mandatory  |
| Active power—reactive power mode <sup>b</sup>       | Not required | Mandatory  |
| Constant reactive power mode                        | Mandatory    | Mandatory  |
| <b>Voltage and active power control</b>             |              |            |
| Voltage—active power (volt-watt) mode               | Not required | Mandatory  |

<sup>a</sup>Voltage-reactive power mode may also be commonly referred to as “volt-var” mode.  
<sup>b</sup>Active power-reactive power mode may be commonly referred to as “watt-var” mode.



V<sub>U</sub>: Voltage upper limit for DER continuous operation

Table 7—Minimum reactive power injection and absorption capability

| Category  | Injection capability as % of nameplate apparent power (kVA) rating | Absorption capability as % of nameplate apparent power (kVA) rating |
|---|--|---|
| A<br>(at DER rated voltage)                       | 44   | 25  |
| B<br>(over the full extent of ANSI C84.1 range A) | 44   | 44  |

16





### Quais recomendações considerar

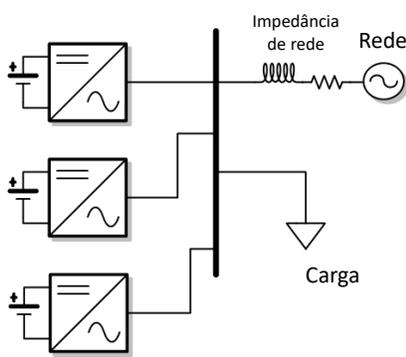
- O projeto II não abordará todas as funções necessárias para a conexão de um conversor à rede elétrica;
- Os alunos, porém devem observar:
  - Normas de EMI da CISPR 11;
  - Limites de distorção harmônica da IEEE 519/1547;
  - Limites para condição normal de operação da IEEE 1547;
  - Limite mínimo de capacidade de injeção de potência reativa;
- Os conversores devem ser munidos dos modos
  - Controle de potência ativa/reativa para operação conectada (limitado apenas pela capacidade do conversor);
  - Controle droop de P-f e Q-V (operação ilhada);
- As demais exigências serão desprezadas

19



### Operação conectada - Injeção de potência

- Sistema em estudo



- Temas a serem discutidos:
  - Filtro de conexão
  - Transformadas de clarke e Park;
  - PLL;
  - Controle  $\alpha\beta$ ;
  - Controle  $dq0$

20



**Operação conectada - Injeção de potência**

- **Objetivos de controle**
  - Regular a potência ativa e reativa injetada pelo conversor na rede;
  - Atender normas de distorção harmônica e EMI;
  - Manter a tensão e frequência da linha dentro dos limites normais de operação;
- **Desafios:**
  - Como medir potência ativa e reativa para fins de controle?
  - Como saber se a corrente de saída do conversor está sincronizada com a tensão de rede;
  - Como monitorar as condições do ponto de acoplamento comum?

21



**UFMG**

**Medição de potências:**  
Teoria PQ  
Transformadas de Clarke e Park

**gep**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG



## Medição de Potências – Teoria PQ

- Com a maior presença de eletrônica de potência no sistema elétrico, novas definições sobre o fluxo de potência e energia considerando reativos e harmônicos foram desenvolvidas, ainda nas décadas de 80/90;
- Em 1982-84, Akagi *et al.* desenvolveram a teoria PQ, a qual reflete uma sistema trifásico para um referencial estacionário  $\alpha\beta$ , utilizando a transformada de Clarke e a partir deste novo referencial redefine os conceitos de potência ativa, reativa e harmônica;
- Nesta definição, o eixo estacionário  $\alpha$  é paralelo ao eixo  $a$  do plano  $abc$  e o sentido do eixo  $\beta$  é tal que se a sequência de fase é  $abc$  ela será  $\alpha\beta$  no novo plano;
- O eixo  $0$  representa as grandezas de sequência zero do sistema trifásico.

23



## Medição de Potências – Teoria PQ

- Transformada de Clarke
  - Considere um sistema trifásico a três fios

$$v_{abc} = [v_a \ v_b \ v_c]^T$$

$$i_{abc} = [i_a \ i_b \ i_c]^T$$

Pode-se fazer uma mudança de coordenadas ao se aplicar

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

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

$$v_{0\alpha\beta} = M_{0\alpha\beta} v_{abc}$$

$$i_{0\alpha\beta} = M_{0\alpha\beta} i_{abc}$$

$$v_{abc} = M_{0\alpha\beta}^{-1} v_{0\alpha\beta}$$

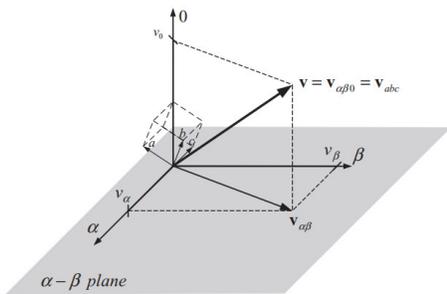
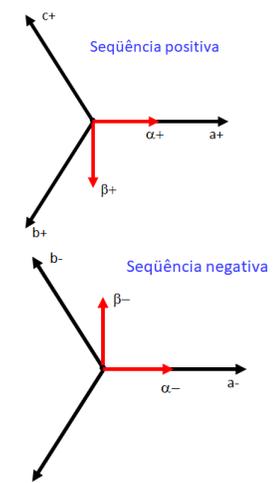
$$i_{abc} = M_{0\alpha\beta}^{-1} i_{0\alpha\beta}$$

24

**gpep**  
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

### Medição de Potências - Teoria PQ

- Transformadas de Clarke
  - Representação

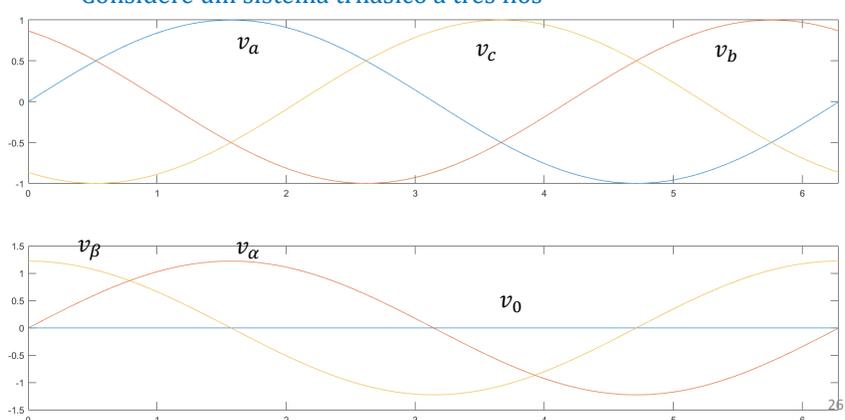



25

**gpep**  
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

### Medição de Potências - Teoria PQ

- Transformadas de Clarke e Park
  - Considere um sistema trifásico a três fios



26



## Medição de Potências - Teoria PQ

- Em um sistema a três fios, sem conexão de neutro, pode-se escrever

$$\left. \begin{aligned} e &= v_\alpha + jv_\beta \longrightarrow e = \sqrt{3} V e^{j(\omega t + \phi_V)} \\ i &= i_\alpha + ji_\beta \longrightarrow i = \sqrt{3} I e^{j(\omega t + \phi_I)} \\ e_{abc} &= v_a + v_b e^{\frac{j2\pi}{3}} + v_c e^{-\frac{j2\pi}{3}} = \frac{3\sqrt{2}}{2} V e^{j(\omega t + \phi_V)} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} e &= \sqrt{\frac{2}{3}} e_{abc} \\ i &= \sqrt{\frac{2}{3}} i_{abc} \end{aligned}$$


---


$$s = ei^*$$

$$s = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + j(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) \longrightarrow \begin{aligned} p &= v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta && \text{Potência ativa} \\ q &= v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta && \text{Potência imaginária} \end{aligned}$$


## Medição de Potências - Teoria PQ

- Transformadas de Clarke e Park
  - Teoria da potência instantânea
    - Em um sistema a três fios  $i_0 = 0$

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad \frac{V_{DC}}{V_{tri}}$$

- Para sinais senoidais equilibrados

$$P = p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta$$

$$Q = q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}$$



## Medição de Potências - Teoria PQ

- Transformadas de Clarke e Park
  - Teoria da potência instantânea
    - Caso hajam harmônicos ou desequilíbrios na tensão

$$p = \bar{p} + \tilde{p}$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q}$$

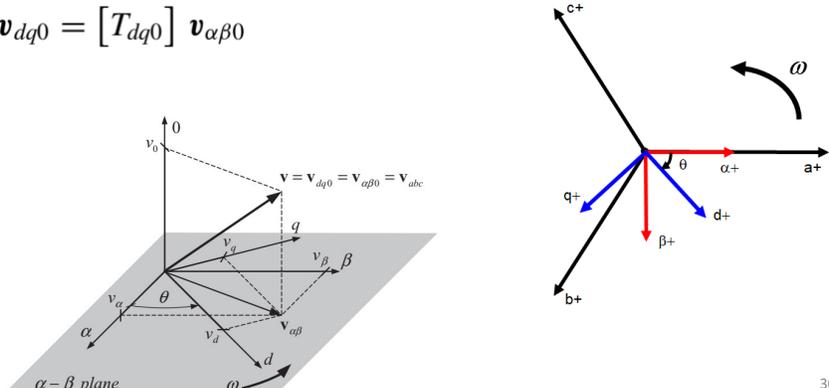
$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0$$

29



## Medição de potências - Eixo síncrono

- Transformada de Park
  - Synchronous Reference Frame (dq0)

$$\mathbf{v}_{dq0} = [T_{dq0}] \mathbf{v}_{\alpha\beta 0}$$


30



## Medição de potências - Eixo síncrono

- Transformadas de Clarke e Park
  - Synchronous Reference Frame (dq0)

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix}$$

$$[T_{dq0}]^{-1} = [T_{dq0}]^T$$

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

31



## Medição de potências - Eixo síncrono

- Transformadas de Clarke e Park
  - Synchronous Reference Frame (dq0)
    - Uma modificação comum de se encontrar na representação do dq0 é

$$T_\theta = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix},$$

$$T_\theta^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix},$$

Neste caso,  $|v_{\alpha\beta}|$  possui amplitude equivalente às tensões abc e caso  $\theta = \omega t \rightarrow v_q = \hat{V}$

32



## Medição de potências - Eixo síncrono

- Transformadas de Clarke e Park
  - Synchronous Reference Frame (dq0)
    - Neste caso
 
$$P(t) = \text{Re} \{V(t)I^*(t)\} = \frac{1}{2} (v_d(t)i_d(t) + v_q(t)i_q(t)),$$

$$Q(t) = \text{Im} \{V(t)I^*(t)\} = \frac{1}{2} (v_q(t)i_d(t) - v_d(t)i_q(t)).$$
    - Caso particular, se  $\theta = \omega t$  (sincronizado na fase Va), logo  $v_d = 0$  e  $v_q = \hat{V}$ 

Necessidade de sincronismo

↙

$$P(t) = \frac{1}{2} \hat{V} i_q$$

$$Q(t) = \frac{1}{2} \hat{V} i_d$$

Potência monofásica

33



## Representação de sistemas trifásicos

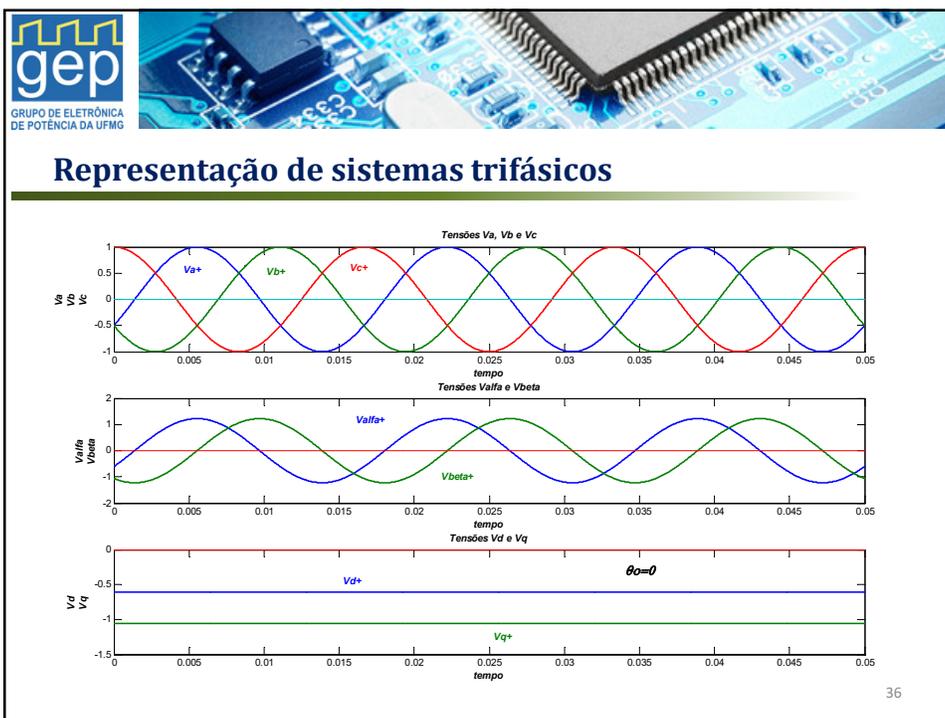
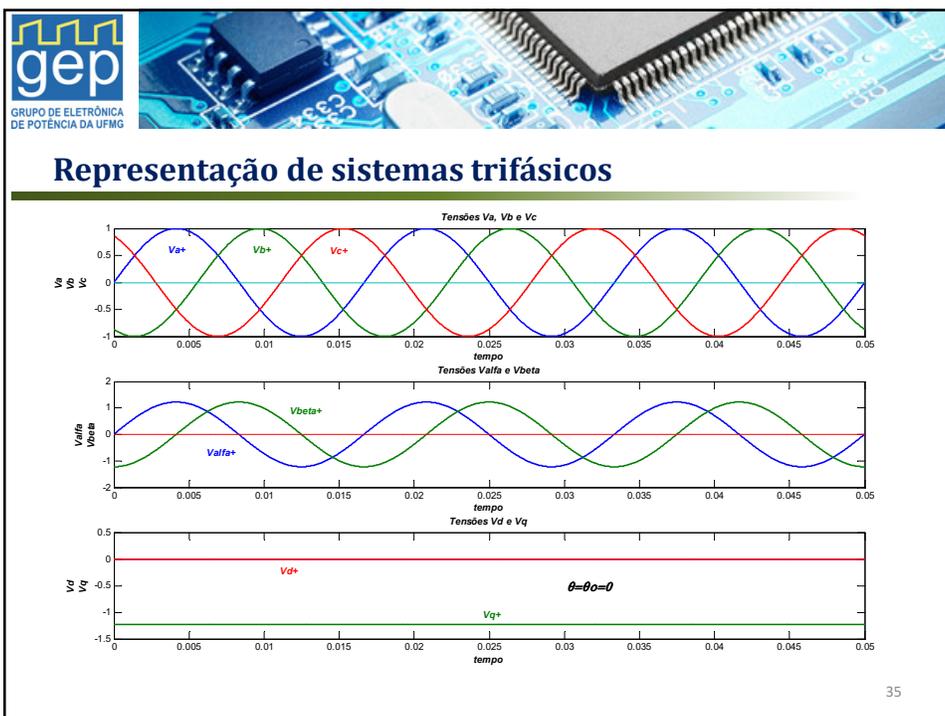
1. Aplicando a Transformada de Clarke e de Park para um sistema de seqüência positiva, teremos:

$$\begin{array}{l}
 v_{a+} = V_+ \cdot \text{sen}(wt + \theta) \\
 v_{b+} = V_+ \cdot \text{sen}(wt - \frac{2\pi}{3} + \theta) \\
 v_{c+} = V_+ \cdot \text{sen}(wt + \frac{2\pi}{3} + \theta)
 \end{array}
 \xrightarrow{\text{Transformada de Clarke e de Park}}
 \begin{array}{l}
 v_{d+} = V_+ \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \text{sen}(\theta - \theta_0) \\
 v_{q+} = -V_+ \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \text{cos}(\theta - \theta_0)
 \end{array}$$

As tensoes de eixo d e q apresentam um nível c.c., cujos valores dependem da amplitude da onda de seqüência positiva e do defasamento de q e  $q_0$ . O valor adotado de  $V_+$  foi de 1V.

Geralmente  $q_0$  é igual a q, o que anula a tensão de eixo d.

34



**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

## Representação de sistemas trifásicos

2. Aplicando a Transformada de Clarke e de Park para um sistema de seqüência negativa, teremos:

$$v_{a-} = V_{-} \cdot \text{sen}(wt + \theta)$$

$$v_{b-} = V_{-} \cdot \text{sen}\left(wt + \frac{2\pi}{3} + \theta\right)$$

$$v_{c-} = V_{-} \cdot \text{sen}\left(wt - \frac{2\pi}{3} + \theta\right)$$

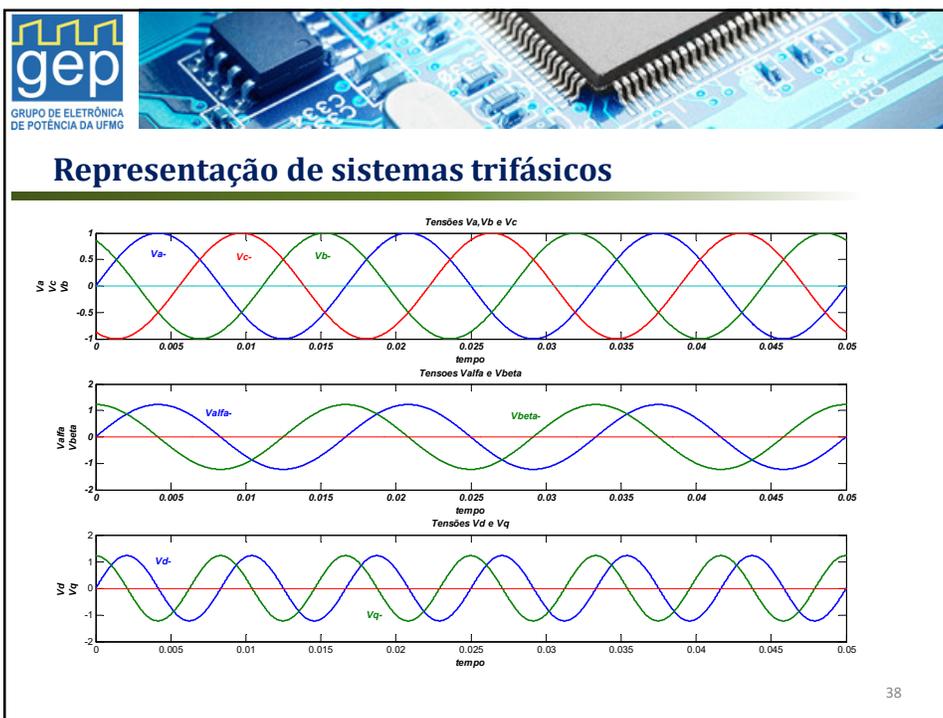

  
 Transformada de  
 Clarke  
 e de Park

$$v_{d-} = V_{-} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \text{sen}(2wt + \theta + \theta_0)$$

$$v_{q-} = V_{-} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \text{cos}(2wt + \theta + \theta_0)$$

As tensões de eixo d e q apresentam um nível c.c. nulo e uma componente alternada com freqüência igual ao dobro da freqüência do sinal de entrada.

37





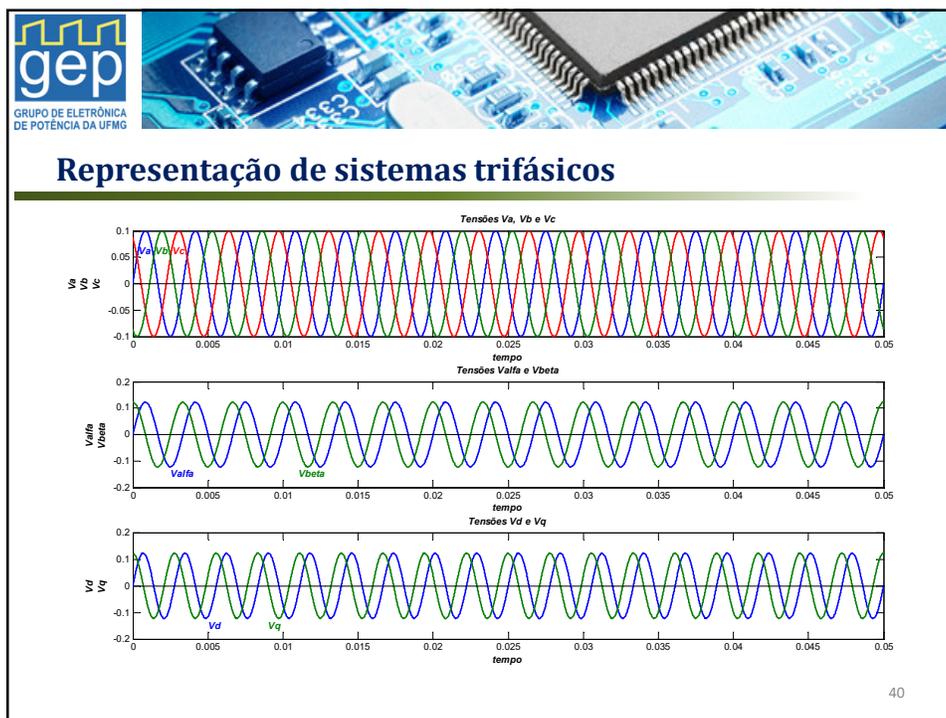
## Representação de sistemas trifásicos

3. O que acontece com os harmônicos quando aplicadas as Transformadas de Clarke e de Park em um sistema de seqüência positiva?

$$\begin{aligned}
 v_{a+} &= V_+ \cdot \text{sen}(5\omega t + \theta) \\
 v_{b+} &= V_+ \cdot \text{sen}\left(5\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta\right) \\
 v_{c+} &= V_+ \cdot \text{sen}\left(5\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta\right)
 \end{aligned}
 \xrightarrow{\text{Transformada de Clarke e de Park}}
 \begin{aligned}
 v_{d+} &= V_+ \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \text{sen}(6\omega t + \theta - \theta_0) \\
 v_{q+} &= -V_+ \cdot \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \text{cos}(6\omega t + \theta - \theta_0)
 \end{aligned}$$

As tensões de eixo d e q apresentam um nível c.c. nulo e uma componente alternada com freqüência igual a quatro vezes a freqüência do sinal de entrada.

39





## Representação de sistemas trifásicos

O que acontece com um sistema de seqüência positiva contendo um termo fundamental e diversos harmônicos?

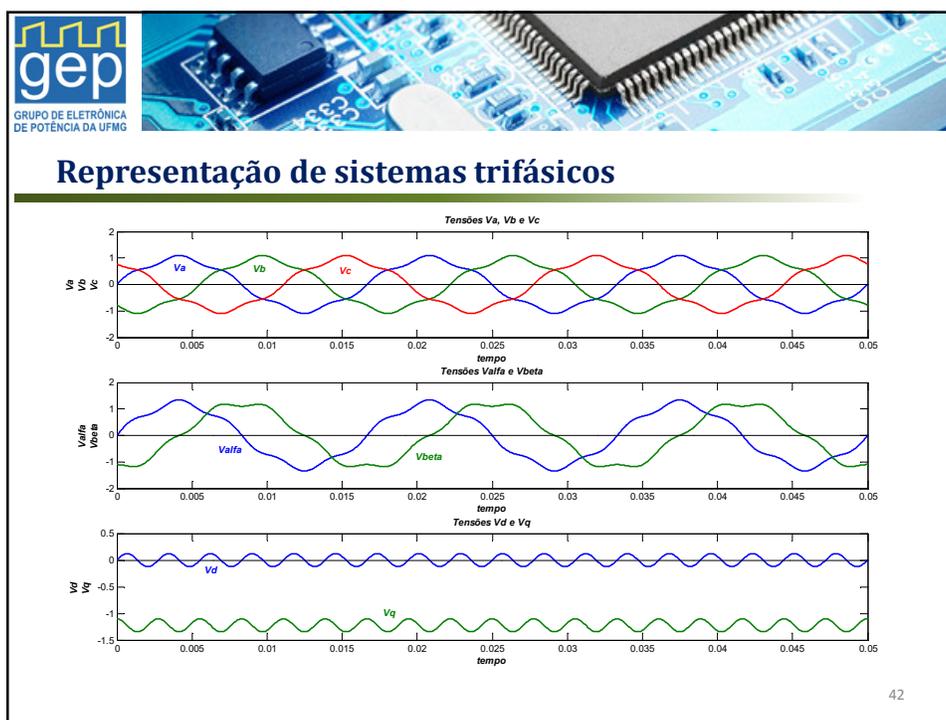
$$v_{a+} = V_{1+} \cdot \text{sen}(wt) + V_{3+} \cdot \text{sen}(6wt + \theta_3)$$

$$v_{b+} = V_{1+} \cdot \text{sen}\left(wt - \frac{2\pi}{3}\right) + V_{3+} \cdot \text{sen}\left(6wt + \theta_3 - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_{c+} = V_{1+} \cdot \text{sen}\left(wt + \frac{2\pi}{3}\right) + V_{3+} \cdot \text{sen}\left(6wt + \theta_3 + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Neste caso aplica-se o teorema da superposição.  
O termo fundamental introduz um valor médio nulo no eixo d e um valor médio negativo no eixo q. Os harmônicos contribuem com uma componente alternada com freqüência igual a quatro vezes a freqüência do sinal de entrada.

41





## Representação de sistemas trifásicos

Sistema trifásico com harmônicos equilibrados (tensões e correntes de mesma amplitude e com defasamento de 120)

| Seqüência | Harmônicos presentes nos eixos abc | Transformada de Park | Harmônicos presentes nos eixos d e q |
|-----------|------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|
| +         | $4\omega$                          | →                    | $3\omega$                            |
| +         | $7\omega$                          | →                    | $6\omega$                            |
| +         | $10\omega$                         | →                    | $9\omega$                            |
| -         | $2\omega$                          | →                    | $3\omega$                            |
| -         | $5\omega$                          | →                    | $6\omega$                            |
| -         | $8\omega$                          | →                    | $9\omega$                            |
| +         | $n$                                | →                    | $n-1$                                |
| -         | $n$                                | →                    | $n+1$                                |

43



## Representação de sistemas trifásicos

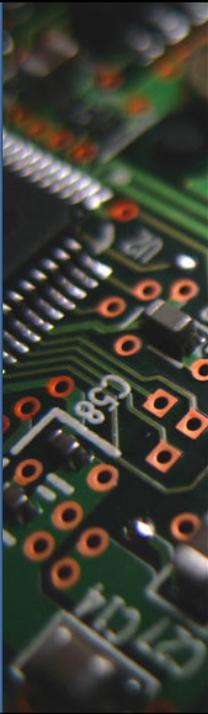
Sistema trifásico com harmônicos desequilibrados: surgem harmônicos de seqüência negativa para harmônicos de seqüência positiva e vice-versa

| Seqüência | Harmônicos presentes nos eixos abc | Transformada de Park | Harmônicos presentes nos eixos d e q |
|-----------|------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|
| +         | $4\omega$                          | →                    | $3\omega$ e $5\omega$                |
| +         | $7\omega$                          | →                    | $6\omega$ e $8\omega$                |
| +         | $10\omega$                         | →                    | $9\omega$ e $11\omega$               |
| -         | $2\omega$                          | →                    | $3\omega$ e $\omega$                 |
| -         | $5\omega$                          | →                    | $6\omega$ e $4\omega$                |
| -         | $8\omega$                          | →                    | $9\omega$ e $7\omega$                |
| +         | $n$                                | →                    | $n-1$ e $n+1$                        |
| -         | $n$                                | →                    | $n+1$ e $n-1$                        |

44



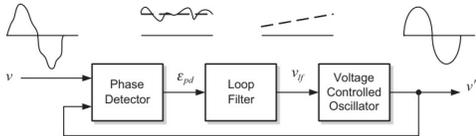

## Sincronismo : Phase Locked Loop (PLL)

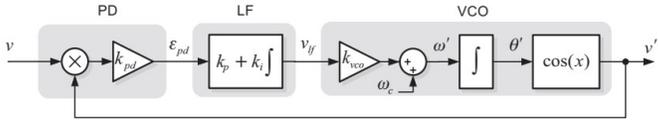



### Sincronismo com a rede

- Sincronização – Princípio básico



**Figure 4.4** Basic structure of a PLL



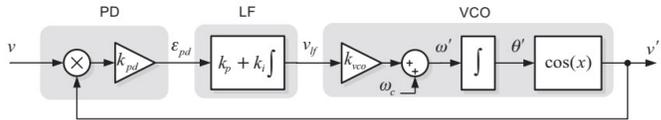
**Figure 4.5** Block diagram of an elementary PLL

46




## Sincronismo com a rede

- Princípio básico



**Figure 4.5** Block diagram of an elementary PLL

$v = V \sin(\theta) = V \sin(\omega t + \phi)$   
 $v' = \cos(\theta') = \cos(\omega' t + \phi')$   
 $\varepsilon_{pd} = V k_{pd} \sin(\omega t + \phi) \cos(\omega' t + \phi')$

Ripple de 2° harmônico atenuado pelo LF

$$= \frac{V k_{pd}}{2} \left[ \underbrace{\sin((\omega - \omega')t + (\phi - \phi'))}_{\text{low-frequency term}} + \underbrace{\sin((\omega + \omega')t + (\phi + \phi'))}_{\text{high-frequency term}} \right]$$

$\bar{\varepsilon}_{pd} = \frac{V k_{pd}}{2} \sin((\omega - \omega')t + (\phi - \phi'))$   
 $\bar{\varepsilon}_{pd} = \frac{V k_{pd}}{2} \sin(\phi - \phi')$

Se o erro for pequeno

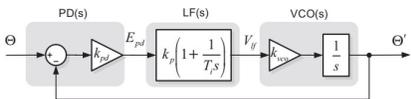
$$\bar{\varepsilon}_{pd} = \frac{V k_{pd}}{2} (\theta - \theta')$$

47




## Sincronismo com a rede

- Princípio básico



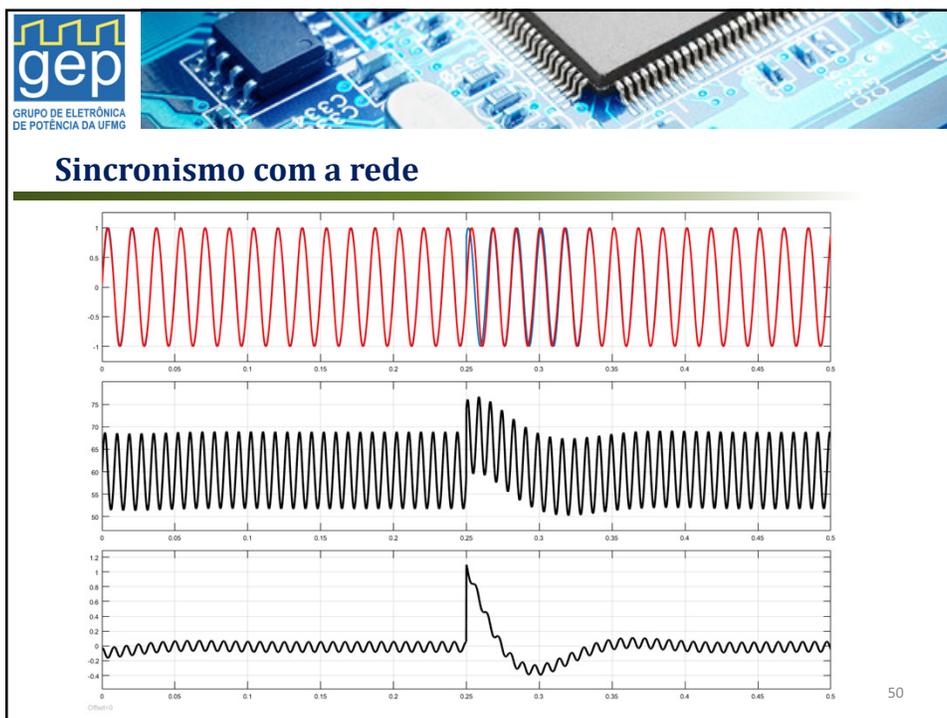
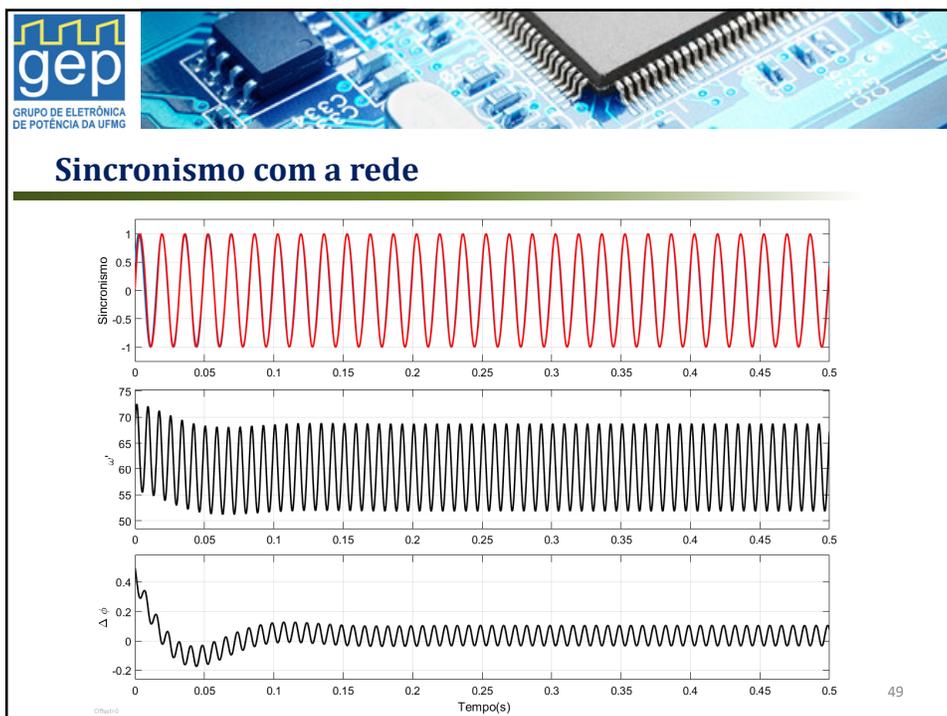
**Figure 4.6** Small signal mode of an elementary PLL

Linearizando a resposta:

- Phase detector:  $E_{pd}(s) = \frac{V}{2} (\Theta(s) - \Theta'(s))$
- Loop filter:  $V_{\Omega}(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \varepsilon_{pd}(s)$
- Controlled oscillator:  $\Theta'(s) = \frac{1}{s} V_{\Omega}(s)$

$$H_{\theta}(s) = \frac{\Theta'(s)}{\Theta(s)} = \frac{LF(s)}{s + LF(s)} = \frac{K_p s + \frac{K_p}{T_i}}{s^2 + K_p s + \frac{K_p}{T_i}}$$

48



**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

## Sincronismo com a rede

- Outras estruturas de PLL buscam emular sistemas trifásicos, se valendo das transformadas de Clarke e Park
- Estas PLL utilizam um gerador de quadratura para emular um sistema em referencial  $\alpha\beta 0$ . Com a transformada de Park se traduz o sinal monofásico em eixos d e q, de modo que a PLL busca regular o eixo q para zero, tendo a fase estimada como elemento realimentado;
- Assim, caso  $v_q$  seja nulo, o sinal de fase será igual ao do sinal de entrada

51

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

## Sincronismo com a rede

- Exemplos de PLL em quadratura:

**Deslocamento de um quarto de onda**

**Transformada inversa de Park**

**SOGI PLL**

52

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

## Sincronismo com a rede

- Transformada inversa de Park

53

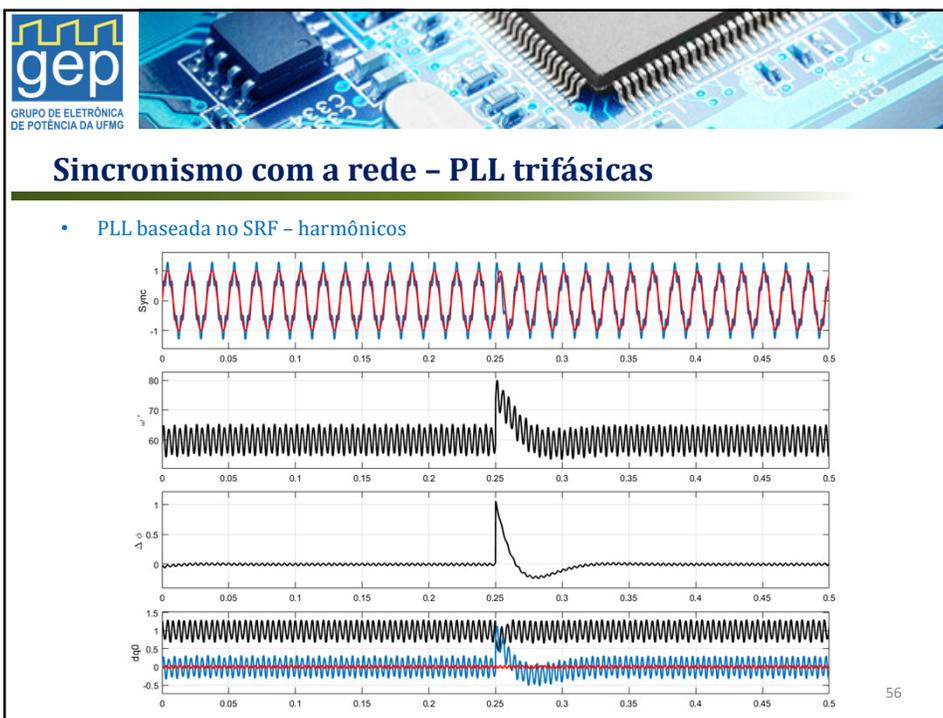
**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

## Sincronismo com a rede - PLL trifásicas

- PLL baseada no SRF

- Solução simples;
- Apresenta problemas em relação à desequilíbrios de tensão e harmônicos

54





**Sincronismo com a rede - PLL trifásicas**

- O aparecimento de oscilações nas grandezas estimadas obriga o uso de filtros passa-baixas ou filtros sintonizados para se poder empregar tais estimativas no monitoramento do ponto de acoplamento e na síntese de correntes harmônicas;
- Esses filtros passa-baixas reduzem a dinâmica da PLL;
- Em sistemas onde essa perda de dinâmica não compromete o desempenho do conversor, essas oscilações não são problemáticas;
- Outras estruturas de PLL permitem que se tenha uma estimativa de grandezas mais insensível à presença de desequilíbrios e harmônicos, ex:
  - Decoupled Double Synchronous Reference Frame PLL (DDSRF-PLL) ;
  - The Double Second-Order Generalized Integrator FLL (DSOGI-FLL)

57



**Filtro de conexão e malhas de controle**

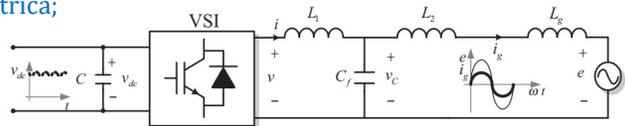
UFMG

g  
ep  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

## Conexão com a rede

- Filtro de conexão com a rede
  - Comumente se utiliza um filtro LCL para conectar inversores à rede elétrica;



- Projeto L1
 
$$L_1 = \frac{v_{dc}}{4\Delta I_{Lmax} f_{sw}}$$
- Projeto Cf
 
$$C_f = \frac{0.05}{Z_b \omega} = \frac{0.05 \cdot S_b}{V_b^2 \omega}$$
- L2 é calculado para dar a atenuação adequada à harmônicos de corrente;
- Um resistor de damping pode ser utilizado para reduzir a ressonância. Colocar  $R_d = 1/3 X_{cf}$  em wres;

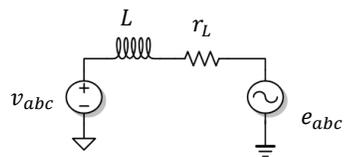
$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L + L_g}{L \cdot L_g \cdot C_f}}$$

59

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

## Conexão com a rede

- Modelagem
  - Uma estratégia comum de ser utilizada considera que a influência do capacitor do filtro é muito pequena e assim, modela-se o filtro LCL como um simples filtro L, onde  $L = L_1 + L_g$ ;



$$v_{abc} = LI \frac{d}{dt} i_{abc} + r_L I i_{abc} + e_{abc}$$

- Em circuitos equilibrados, não há tensão de neutro

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad v_{abc} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad i_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$e_{abc} = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

60



## Conexão com a rede

- Modelagem – Referencial  $\alpha\beta 0$

$$\frac{d}{dt} i_{abc} = \frac{1}{L} I v_{abc} - \frac{r_L}{L} I i_{abc} - \frac{1}{L} I e_{abc}$$

$$M_{0\alpha\beta}^{-1} \dot{i}_{0\alpha\beta} = \frac{1}{L} I M_{0\alpha\beta}^{-1} v_{0\alpha\beta} - \frac{r_L}{L} I M_{0\alpha\beta}^{-1} i_{0\alpha\beta} - \frac{1}{L} I M_{0\alpha\beta}^{-1} e_{0\alpha\beta}$$

Multiplicando ambos os lados por  $M_{0\alpha\beta}$

$$\frac{d}{dt} i_{0\alpha\beta} = \frac{1}{L} I v_{0\alpha\beta} - \frac{r_L}{L} I i_{0\alpha\beta} - \frac{1}{L} I e_{0\alpha\beta}$$

$$i_{0\alpha\beta} = (sLI + r_L I)^{-1} (v_{0\alpha\beta} - e_{0\alpha\beta})$$

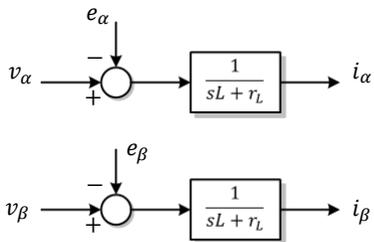
$$i_0 = 0 \quad i_\alpha = \frac{v_\alpha - e_\alpha}{sL + r_L} \quad i_\beta = \frac{v_\beta - e_\beta}{sL + r_L}$$

61



## Conexão com a rede

- Modelagem – Referencial  $\alpha\beta 0$



62



**Conexão com a rede**

- Modelagem – Referencial  $dq0$

$$\frac{d}{dt} i_{0\alpha\beta} = \frac{1}{L} I v_{0\alpha\beta} - \frac{r_L}{L} I i_{0\alpha\beta} - \frac{1}{L} I e_{0\alpha\beta}$$

$$T_{0dq} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \end{bmatrix} \quad \frac{d}{dt} T_{0dq}^{-1} i_{0dq} = \frac{1}{L} I T_{0dq}^{-1} v_{0dq} - \frac{r_L}{L} I T_{0dq}^{-1} i_{0dq} - \frac{1}{L} I T_{0dq}^{-1} e_{0dq}$$

$$T_{0dq}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \frac{d}{dt} T_{0dq}^{-1} i_{0dq} = \left( \frac{d}{dt} T_{0dq}^{-1} \right) i_{0dq} + T_{0dq}^{-1} \frac{d}{dt} i_{0dq}$$

$$\theta = \omega t + \phi \quad \frac{d}{dt} T_{0dq}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \sin\theta & -\omega \cos\theta \\ 0 & \omega \cos\theta & -\omega \sin\theta \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

63



**Conexão com a rede**

- Modelagem – Referencial  $dq0$

$$\frac{d}{dt} T_{0dq}^{-1} i_{0dq} = \frac{1}{L} I T_{0dq}^{-1} v_{0dq} - \frac{r_L}{L} I T_{0dq}^{-1} i_{0dq} - \frac{1}{L} I T_{0dq}^{-1} e_{0dq}$$

Multiplicando  $T_{0dq}$  em ambos os lados

$$T_{0dq} \frac{d}{dt} T_{0dq}^{-1} i_{0dq} = \frac{1}{L} I v_{0dq} - \frac{r_L}{L} I i_{0dq} - \frac{1}{L} I e_{0dq}$$

$$T_{0dq} \frac{d}{dt} T_{0dq}^{-1} i_{0dq} = T_{0dq} \left( \frac{d}{dt} T_{0dq}^{-1} \right) i_{0dq} + \frac{d}{dt} i_{0dq}$$

$$T_{0dq} \frac{d}{dt} T_{0dq}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -\omega \sin\theta & -\omega \cos\theta \\ 0 & \omega \cos\theta & -\omega \sin\theta \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$T_{0dq} \frac{d}{dt} T_{0dq}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega \\ 0 & \omega & 0 \end{bmatrix}$$

64



## Conexão com a rede

- Modelagem – Referencial  $dq0$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{i}_{0dq} = \frac{1}{L} \mathbf{I} v_{0dq} - \frac{r_L}{L} \mathbf{I} \mathbf{i}_{0dq} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega \\ 0 & \omega & 0 \end{bmatrix} \mathbf{i}_{0dq} - \frac{1}{L} \mathbf{I} e_{0dq}$$

$i_0 = 0$

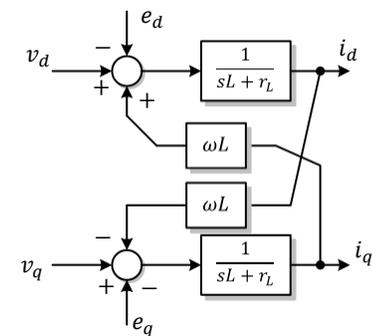
$$\left. \begin{aligned} L \frac{d}{dt} i_d &= v_d - r_L i_d + \omega L i_q - e_d \\ L \frac{d}{dt} i_q &= v_q - r_L i_q - \omega L i_d - e_q \end{aligned} \right\} \begin{aligned} i_d &= \frac{v_d + \omega L i_q - e_d}{sL + r_L} \\ i_q &= \frac{v_q - \omega L i_d - e_q}{sL + r_L} \end{aligned}$$

65



## Conexão com a rede

- Modelagem – Referencial  $dq0$



66



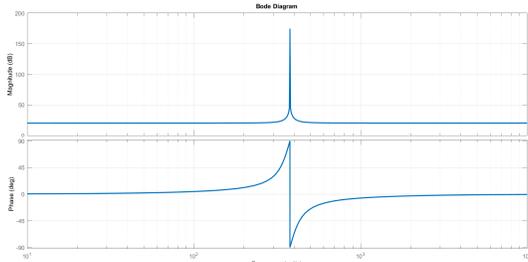



## Conexão com a rede

- Diagrama de controle  $-\alpha\beta$ 
  - Como as variáveis de eixo estacionário não são contínuas,  $Ci(s)$  não é um tradicional PI;
  - Opção:
    - Proporcional-ressonante;
    - Proporcional-integral-ressonante

$$PR(s) = k_p + \frac{2k_r s}{s^2 + \omega_0^2}$$

$$PIR(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + \frac{2k_r s}{s^2 + \omega_0^2}$$

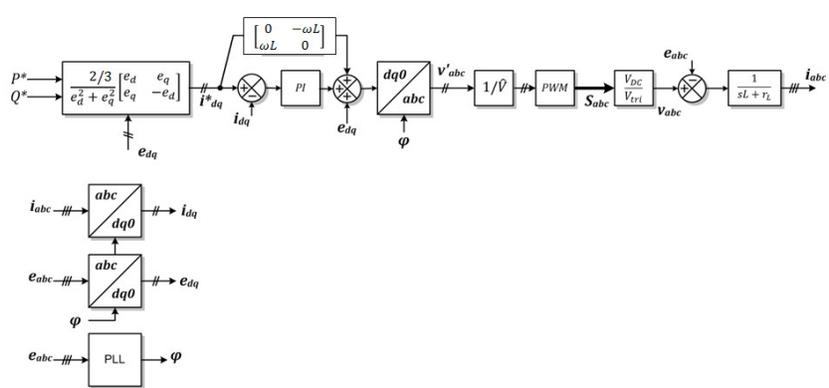


69




## Conexão com a rede

- Diagrama de controle  $-dq0$



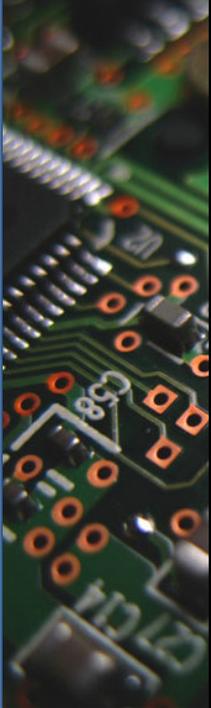
$i_{abc} \rightarrow \begin{matrix} abc \\ \diagdown \\ dq0 \end{matrix} \rightarrow i_{dq}$

$e_{abc} \rightarrow \begin{matrix} abc \\ \diagdown \\ dq0 \end{matrix} \rightarrow e_{dq}$

$e_{abc} \rightarrow \text{PLL} \rightarrow \varphi$

70





## Operação Conectada: Droop control



GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG




GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

### Operação ilhada- Droop

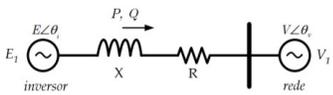
- Na operação ilhada, múltiplos conversores devem operar em paralelo, partilhando a potência da carga;
- Neste caso, não existe um gerador de potência muito superior aos demais, de modo que a estratégia de controle de injeção de potência ativa e reativa pode levar à instabilidade do sistema;
- Uma das técnicas de paralelismo de conversores mais usual é a chamada *droop control*, a qual busca empregar fundamentos de sistemas elétricos de potência;

72

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

## Operação ilhada- Droop

- Paralelismo de conversores com uma barra infinita



$$S = EI^* = E\angle\theta_i \left( \frac{E\angle\theta_i - V\angle\theta_v}{R + jX} \right)^* = P + jQ$$

$$P(E, \delta) = \frac{1}{R^2 + X^2} (RE^2 - REV \cos \delta + XEV \sin \delta)$$

$$Q(E, \delta) = \frac{1}{R^2 + X^2} (XE^2 - XEV \cos \delta - REV \sin \delta)$$

$$\delta = \theta_i - \theta_v$$

$$\delta(t) = \int_0^t [\omega_i(\sigma) - \omega_v(\sigma)] d\sigma$$

- Assumindo que a queda de tensão na linha é muito pequena, pode-se fazer:
  - $\sin \delta \approx \delta$        $\cos \delta \approx 1$

$$P(E, \delta) \approx \frac{1}{R^2 + X^2} (RE^2 - REV + XEV\delta)$$

$$Q(E, \delta) \approx \frac{1}{R^2 + X^2} (XE^2 - XEV - REV\delta)$$

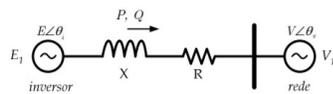
- Condições a serem estudadas:
  - Linha indutiva;
  - Linha Resistiva;

As frequências devem ser iguais

73

**gpe**  
GRUPO DE ELETRÔNICA  
DE POTÊNCIA DA UFMG

## Operação ilhada- Droop



Linha puramente Indutiva

$$P(E, \delta) \Big|_{R=0} \approx \frac{EV\delta}{X} \approx P(\delta),$$

$$Q(E, \delta) \Big|_{R=0} \approx \frac{E^2 - EV}{X} \approx Q(E).$$

Verificando a sensibilidade:

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} = \frac{EV}{X} \gg \gg \frac{\partial P}{\partial E} = \frac{V\delta}{X}$$

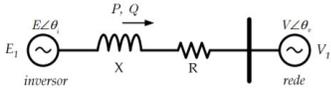
$$\frac{\partial Q}{\partial \delta} = 0 \qquad \frac{\partial Q}{\partial E} = \frac{2E - V}{X}$$

- Nota-se que há uma relação direta de  $\delta$  com a potência ativa que flui pela linha e uma relação de  $E$  com a potência reativa;
- Há um bom desacoplamento entre essas influências, de modo que  $\delta$  não impacta  $Q$  e  $E$  impacta pouco  $P$ ;

74



## Operação ilhada- Droop



Linha puramente resistiva

$$P(E, \delta) \Big|_{X=0} \approx \frac{E^2 - EV}{R} = P(E),$$

$$Q(\delta) \Big|_{X=0} \approx -\frac{EV\delta}{R} = Q(\delta).$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \delta} \approx -\frac{V}{R}E \gg \gg \frac{\partial Q}{\partial E} \approx -\frac{V}{R}\delta$$

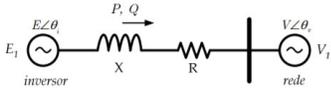
$$\frac{\partial P}{\partial \delta} = 0 \qquad \frac{\partial P}{\partial E} = \frac{2E - V}{R}$$

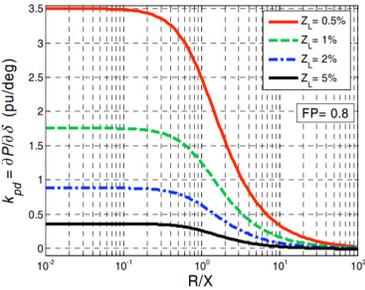
- Uma linha resistiva inverte as dependências entre P, Q e E,  $\delta$

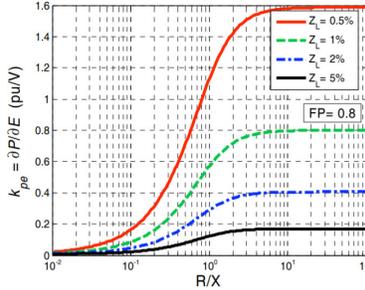
75



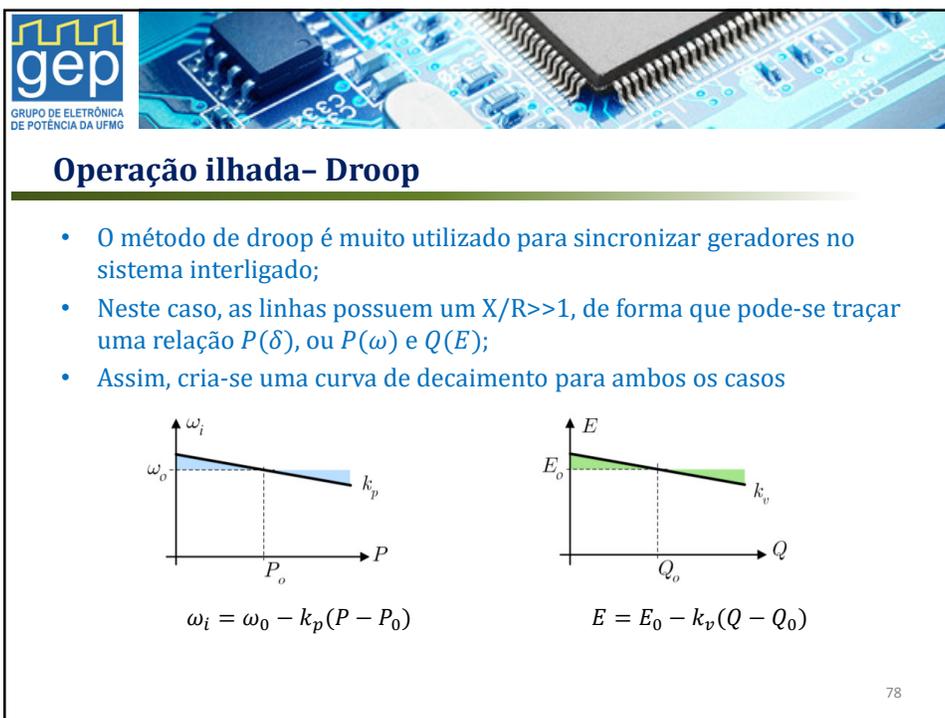
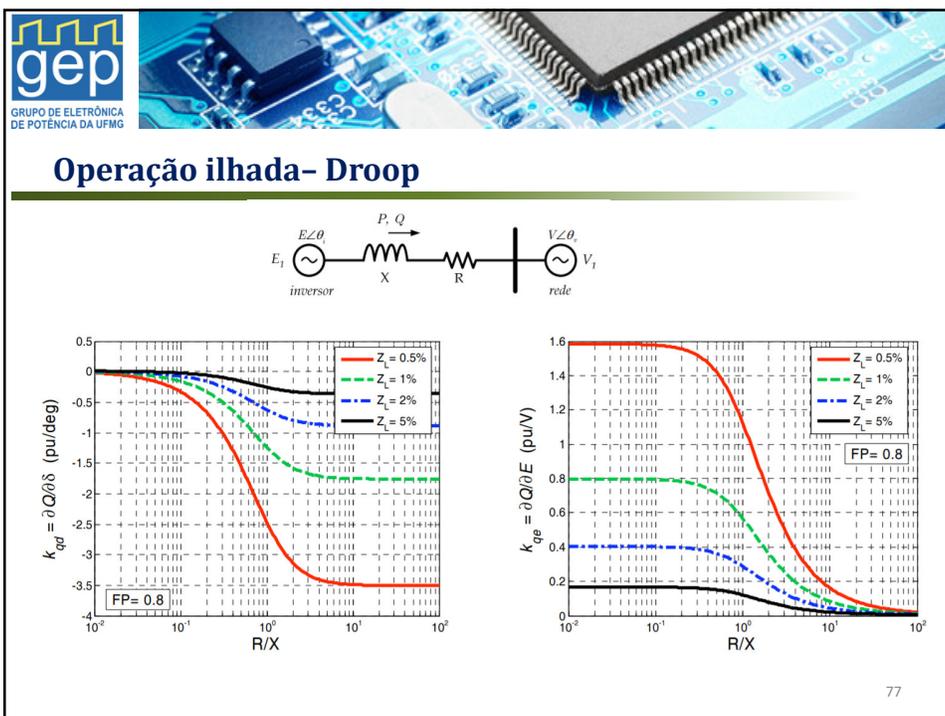
## Operação ilhada- Droop

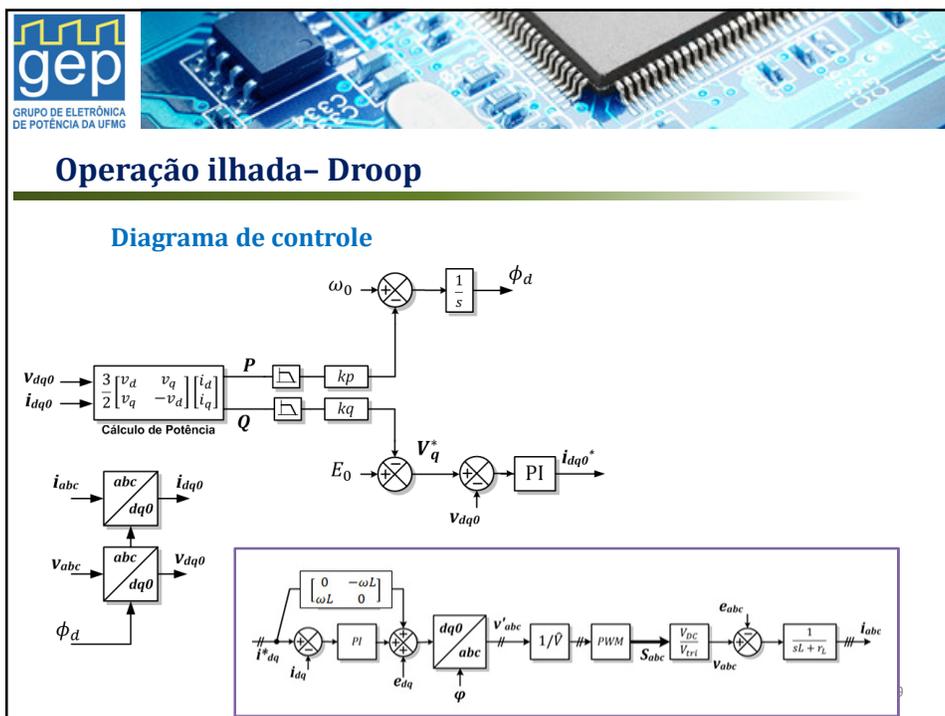






76







## Operação ilhada- Droop

- Exemplo de implementação de impedância no eixo dq0

$$VZ_d = r_L i_d + \omega L i_q$$

$$VZ_q = r_L i_q - \omega L i_d$$

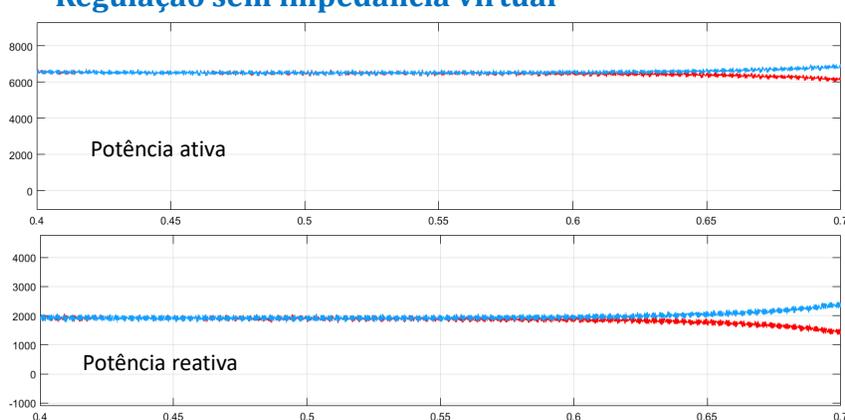
- Subtrair das referências de tensão

81



## Operação ilhada- Droop

- Regulação sem impedância virtual



82

