

Estruturas de Controle de Conversores para Conexão de Fontes a Microrredes

Prof. Antonio Simões Costa
Labspot - UFSC

Estruturas de Controle Utilizados em Microrredes

- Serão abordados os seguintes controladores/estruturas de controle:
 - Proporcional-Integral (PI);
 - Proporcional-Ressonante (PR);
 - Controle via *Droop*;
 - Desacoplamento via *Feedforward*;
 - Controle Multimalhas;
- *Aplicação*: Controle de Potência direcionado por tensão.

Controlador PI

- Função de Transferência:

$$C_{PI}(s) = K_p + \frac{1}{sT_i}$$

- Geralmente utilizado no sistema de referência dq , já que garante erro de rastreamento ao degrau nulo em regime permanente \Rightarrow erro nulo a sinais senoidais balanceados;
- Limitações em operação desbalanceada e limitações quanto à rejeição de harmônicos;
- Não é aplicável a sistemas monofásicos;
- Implementação exige PLL e transformações de sistemas de referência.

Controlador Proporcional-Ressonante

- Função de Transferência:

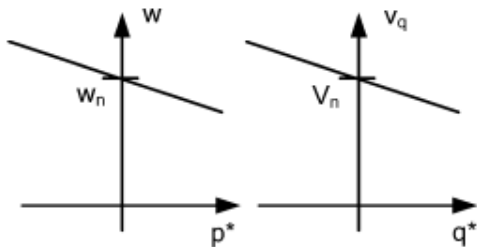
$$C_{PR}(s) = K_p + K_r \frac{s}{s^2 + \omega_r^2}$$

- Normalmente implementado no sistema de referência $\alpha\beta$, mas também pode ser utilizado no sist. de ref. abc ;
- Proporciona ganhos elevados na frequência fundamental da rede, e portanto pode rastrear referências senoidais nesta frequência;
- Para bom desempenho, ω_r deve estar sintonizada com a frequência fundamental da rede \Rightarrow necessidade de ajuste adaptativo, já que a frequência da rede pode variar.

Controle via “Droop” (Estatismo) - I

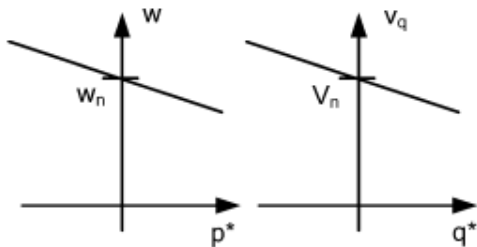
- Baseia-se no mesmo princípio do estatismo de reguladores de velocidade de unidades geradoras convencionais;
- Como ocorre com a geração convencional, o controle via “droop” também permite a coordenação da atuação de inversores que conectam fontes de geração a microrredes;
- Princípio do “droop” convencional aplicável à relação *frequência x potência ativa*, mas pode ser estendido também para *tensão x potência reativa*.

Controle via “Droop” (Estatismo) - II



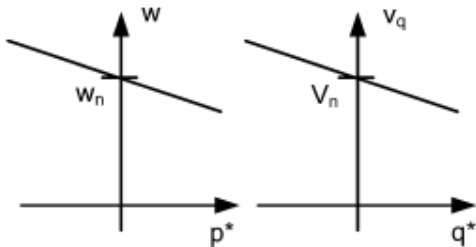
- Quando a frequência decresce, a característica modifica a potência de referência p^* de modo a aumentar a potência ativa gerada;

Controle via “Droop” (Estatismo) - II



- Quando a frequência decresce, a característica modifica a potência de referência p^* de modo a aumentar a potência ativa gerada;
- Do mesmo modo, quando a tensão decresce, a característica $V \times q$ determina o aumento da pot. reativa de referência q^* .

Controle via “Droop” (Estatismo) - III



- Se k_p e k_q são as inclinações das características acima medidas com respeito aos eixos verticais e p_n^* (q_n^*) corresponde a ω_n (V_n), então para valores medidos ω_{med} e V_{med} :

$$p^* = p_n^* + k_p(\omega_n - \omega_{med}), \quad q^* = q_n^* + k_q(V_n - V_{med})$$

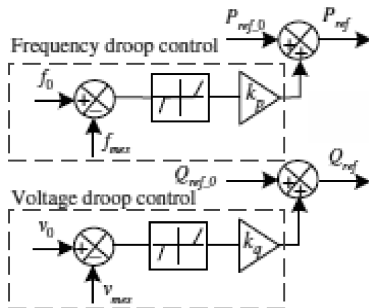
Ajuste das Referências de Potência via “Droop”

- Referência de potência ativa:

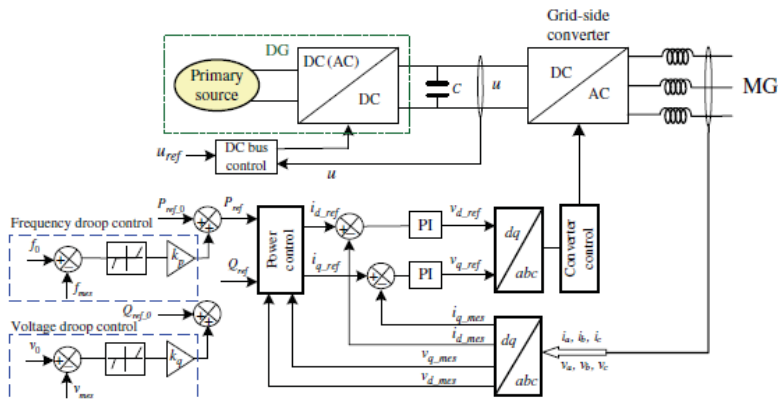
$$P_{ref} = P_{ref,0} + k_p(f_0 - f_{med})$$

- Referência de potência reativa:

$$Q_{ref} = Q_{ref,0} + k_q(V_0 - V_{med})$$



Aplicação: Controle de Potência via “Droop”



Observações sobre o Controle de Potência via “Droop”

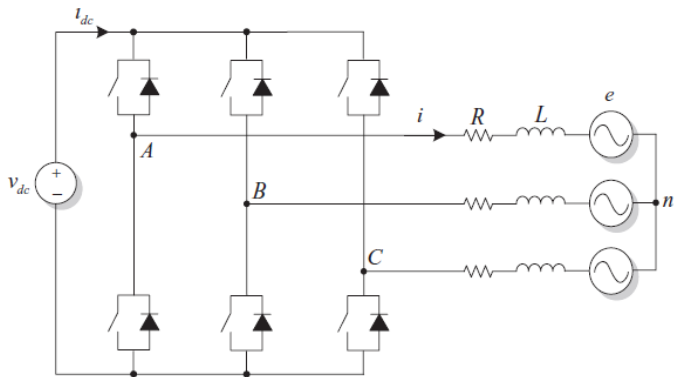
- É de implementação simples em termos de hardware;
- Prescinde de ação coordenadora da supervisão central (isto é, do MGCC);
- A implementação local permite resposta rápida e boa adequação para controle de frequência e regulação de tensão;
- O controle $V \times Q$ é igualmente importante, para evitar correntes circulantes entre fontes;
- Neste tipo de estratégia de controle local, cada fonte conectada à μR via inversores tem que se submeter ao controle via *Droop*, para que haja repartição adequada da geração de potência ativa e reativa;
- *Desvantagem*: dificulta a otimização do despacho global, já que não há informação sobre outras μR s.

Estratégia de Desacoplamento via “Feedforward”

- Conforme será visto a seguir, o modelo de referência síncrona leva ao **acoplamento cruzado** das equações do modelo em variáveis dq ;
- Este acoplamento é indesejável, pois complica o projeto desacoplado dos controladores de corrente e tensão;
- Uma solução muito empregada para lidar com este problema é a introdução de malhas *feedforward* com o objetivo de desacoplar mutuamente as equações referidas aos dois eixos;
- O problema ocorre independentemente do tipo de filtro (L , LCL) utilizado, como se verá na sequência.

Modelo de Inversor com Filtro L (I)

- Inversor trifásico conectado à rede via filtro L:



Modelo de Inversor com Filtro L (II)

- No caso da utilização de um filtro L , as equações que descreve a rede utilizando o *modelo médio* são:

$$\bar{\mathbf{V}}_{dc} = \mathbf{V}_g + \mathbf{R} \mathbf{i} + \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}}{dt}$$

onde:

- $\bar{\mathbf{V}}_{dc} = \mathbf{d} \times \mathbf{V}_{dc}$ é o vetor de tensões trifásicas médias do inversor, onde \mathbf{d} é uma matriz diagonal com *duty cycles*;
- \mathbf{i} é o vetor de correntes trifásicas: $\mathbf{i} = [i_a \quad i_b \quad i_c]^t$;
- \mathbf{V}_g é a tensão trifásica da rede;
- \mathbf{R} e \mathbf{L} são matrizes diagonais com as resistências parasitas e as indutâncias do filtro.

Modelo de Inversor com Filtro L (III)

- Definindo as correntes nos indutores do filtro como variáveis de estado, temos:

$$\frac{d\mathbf{i}}{dt} = \mathbf{L}^{-1}(-\mathbf{R} \mathbf{i} - \mathbf{V}_g + \bar{V}_{dc})$$

- Para utilizar métodos de análise e projeto na referência síncrona, é necessário transformar o modelo para variáveis dq utilizando-se (sob condições balanceadas):

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Modelo de Inversor com Filtro L (IV)

- O modelo resultante, agora expresso na referência síncrona, é:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} - \omega i_q = \frac{1}{L} (-R i_d - V_{g,d} + \bar{V}_{dc,d}) \\ \frac{di_q}{dt} - \omega i_d = \frac{1}{L} (-R i_q - V_{g,q} + \bar{V}_{dc,q}) \end{cases}$$

Modelo de Inversor com Filtro L (IV)

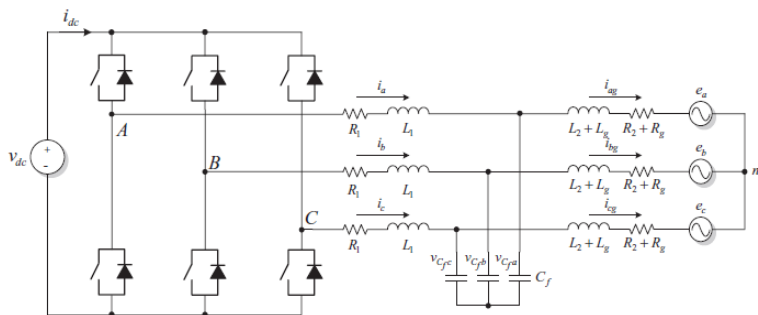
- O modelo resultante, agora expresso na referência síncrona, é:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} - \omega i_q = \frac{1}{L} (-R i_d - V_{g,d} + \bar{V}_{dc,d}) \\ \frac{di_q}{dt} - \omega i_d = \frac{1}{L} (-R i_q - V_{g,q} + \bar{V}_{dc,q}) \end{cases}$$

- Verifica-se portanto que as equações diferenciais nas variáveis dq são **interdependentes**, devido à presença dos termos de acoplamento cruzado ωi_q e ωi_d .

Modelo de Inversor com Filtro LCL (I)

- Inversor trifásico conectado à rede via filtro LCL:



Modelo de Inversor com Filtro LCL (II)

- Seguindo procedimento similar, chegaríamos ao seguinte modelo no espaço de estados para filtro *LCL*:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_{C_f d} \\ v_{C_f q} \\ i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & \omega & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_1}{L_1} & 0 & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_f} & 0 & 0 & \omega & -\frac{1}{C_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_f} & -\omega & 0 & 0 & -\frac{1}{C_f} \\ 0 & 0 & \frac{1}{(L_2 + L_g)} & 0 & -\frac{(R_2 + R_g)}{(L_2 + L_g)} & \omega \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(L_2 + L_g)} & -\omega & -\frac{(R_2 + R_g)}{(L_2 + L_g)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_{C_f d} \\ v_{C_f q} \\ i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_{dc}}{(L_2 + L_g)} & 0 \\ 0 & \frac{v_{dc}}{(L_2 + L_g)} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_d \\ p_q \end{bmatrix} \quad (9.9)$$

Modelo de Inversor com Filtro LCL (III)

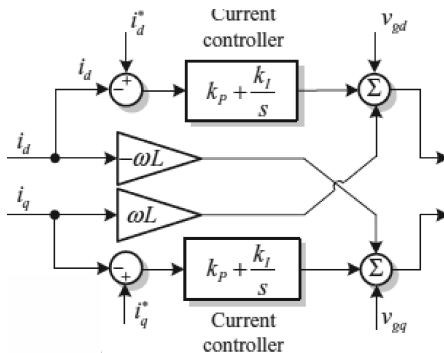
- Matriz de estados **A**:

$$\begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & \omega & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & -\frac{R_1}{L_1} & 0 & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_f} & 0 & 0 & \omega & -\frac{1}{C_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_f} & -\omega & 0 & 0 & -\frac{1}{C_f} \\ 0 & 0 & \frac{1}{(L_2 + L_g)} & 0 & -\frac{(R_2 + R_g)}{(L_2 + L_g)} & \omega \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(L_2 + L_g)} & -\omega & -\frac{(R_2 + R_g)}{(L_2 + L_g)} \end{bmatrix}$$

- Nota-se que as equações de: i_d e i_q ; $v_{Cf,d}$ e $v_{Cf,q}$; $i_{g,d}$ e $i_{g,q}$ são mutuamente acopladas aos pares pelos termos iguais a ω na matriz **A**.

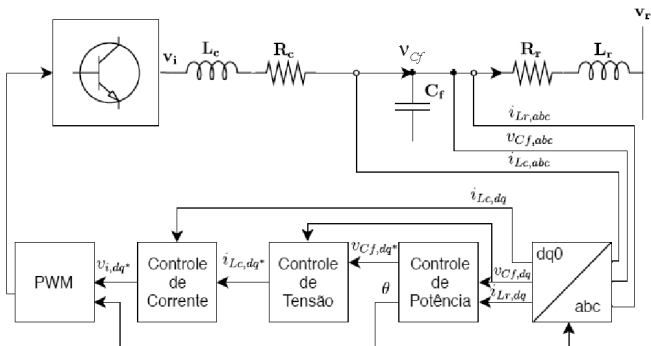
Desacoplamento via “Feedforward”

- Uma estratégia muito utilizada para eliminar o acoplamento cruzado entre variáveis dq utiliza malhas *feedforward* entre as variáveis mutuamente acopladas. Exemplo para as correntes i_d e i_q no caso do filtro L :



Controle através de Controlador Multimalhas

- Outra 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.



Controle de Potência Direcionado por Tensão (I)

- Baseado no uso do sistema de referência dq ;
- Orientado de forma que o eixo d esteja adequadamente alinhado com a tensão da rede;
- As potências ativa e reativa produzidas pelo inversor no sistema de referência dq são dadas por:

$$P = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q)$$

$$Q = \frac{3}{2}(e_q i_d - e_d i_q)$$

- Supondo que o eixo d está perfeitamente alinhado com a tensão da rede via PLL tal que $e_q = 0$:

$$P = \frac{3}{2}e_d i_d$$

$$Q = -\frac{3}{2}e_d i_q$$

Controle de Potência Direcionado por Tensão (II)

- Supondo $e_q = 0$:

$$P = \frac{3}{2} e_d i_d$$

$$Q = -\frac{3}{2} e_d i_q$$

- Portanto, a corrente i_d^* é geralmente controlada para se ajustar o intercâmbio de potência ativa com a rede, enquanto que i_q^* é controlada para ajustar a troca de potência reativa e operação com fator de potência desejado;
- Por exemplo, na situação usual em que se deseja fator de potência unitário (corrente da rede em fase com a tensão da rede), i_q^* deve ser **zero**;
- Observações aplicam-se ao controle **das primeiras harmônicas** de potência ativa e reativa; controladores adicionais podem ser necessários em operação desbalanceada.

Controle de Potência Direcionado por Tensão (III)

- O esquema a ser apresentado é conhecido por *controle PQ em malha aberta*;

Controle de Potência Direcionado por Tensão (III)

- O esquema a ser apresentado é conhecido por *controle PQ em malha aberta*;
- É implementado no sistema de referência dq e utiliza controle *feedforward*;

Controle de Potência Direcionado por Tensão (III)

- O esquema a ser apresentado é conhecido por *controle PQ em malha aberta*;
- É implementado no sistema de referência dq e utiliza controle *feedforward*;
- O controle da tensão DC modifica a referência de potência ativa;

Controle de Potência Direcionado por Tensão (III)

- O esquema a ser apresentado é conhecido por *controle PQ em malha aberta*;
- É implementado no sistema de referência dq e utiliza controle *feedforward*;
- O controle da tensão DC modifica a referência de potência ativa;
- Os sinais de comando de potência ativa e reativa são traduzidos em componentes d e q da corrente de referência a partir de:

$$\begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{gd}^2 + v_{gq}^2} \begin{bmatrix} v_{gd} & -v_{gq} \\ v_{gq} & v_{gd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^* \\ Q^* \end{bmatrix}$$

Controle PQ Direcionado por Tensão em Malha Aberta

