

INVERSOR MONOFÁSICO PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA CONECTADA À REDE ELÉTRICA, COM INJEÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA E CAPACIDADE DE COMPENSAÇÃO REATIVA

Leonardo P. Sampaio¹, Moacyr A. G. de Brito², Guilherme de A. e Melo³, Carlos A. Canesin³

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Avenida Alberto Carazzai, 1640, Cornélio Procópio-PR, Brasil.

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Via Rosalina Maria dos Santos 1233, Campo Mourão-PR, Brasil.

³Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira, Av. Prof. José Carlos Rossi 1370, Ilha Solteira-SP, Brasil.
e-mails: ¹sampaio@utfpr.edu.br; ³canesin@dee.feis.unesp.br

Resumo - Este trabalho propõe uma metodologia de controle de injeção de potência ativa, incluindo a funcionalidade de compensação de reativos, para um inversor monofásico em ponte completa com filtro LCL (FB-VSI-LCL), aplicado à geração distribuída conectada com a rede elétrica em corrente alternada. Propõem-se o uso da linearização pela realimentação dos estados, uma técnica de controle não-linear, em conjunto com as desigualdades matriciais lineares (LMI) e critérios da D-estabilidade, com o objetivo de projetar os controladores para o sistema. O controle do fluxo de potência é realizado a partir do controle do inversor como fonte de corrente, e a partir das equações características P-f e Q-V determina-se o sinal de referência para a malha de tensão. Posteriormente, a malha de tensão gera o sinal de referência para a malha de corrente, sendo assim, o controle é realizado por um sistema multimalhas. Finalmente, os principais resultados experimentais são apresentados, considerando-se um protótipo com potência nominal de 1000VA, com a finalidade de demonstrar a funcionalidade do controle proposto.

Palavras-Chave – Desigualdades Matriciais Lineares, D-Estabilidade, Geração Distribuída, Linearização Por Realimentação Dos Estados, Redes Inteligentes.

SINGLE-PHASE GRID-TIE INVERTER FOR DISTRIBUTED GENERATION, WITH ACTIVE ELECTRIC POWER INJECTION AND REACTIVE COMPENSATION CAPABILITY

Abstract – This paper proposes a methodology to control the active power injection, including the reactive power compensation capability, for a single-phase full-bridge inverter with LCL filter (FB-VSI-LCL), applied to a grid-connected distributed generation. It is proposed the usage of feedback linearization, a nonlinear control technique, along with the Linear Matrix Inequalities (LMI) and D-stability criteria, with the purpose to design the controllers for the system. The power flow control is performed by the control of the inverter as a current source, and by means of the characteristics equations of

P-f and Q-V the voltage reference signal is determined to the voltage loop. Furthermore, the voltage loop generates the reference signal to the current loop control, thus, the control is performed by a multi-loop control system. Finally, the main experimental results are presented, considering a 1000VA inverter prototype, with the purpose to demonstrate the feasibility of the proposed control.

Keywords – Linear Matrix Inequalities, D-Stability, Distributed Generation, Feedback Linearization, Smart Grids.

NOMENCLATURA

FB-VSI-LCL Inversor Monofásico em ponte completa com filtro LCL.

GD Geração Distribuída.

LMI *Linear Matrix Inequalities*.

MPPT *Maximum Power Point Tracking*.

PCC *Point of Common Coupling*.

SLIT Sistema Linear e Invariante no Tempo.

$V_{C_{eficaz}}$ Tensão eficaz no capacitor C_f .

$V_{g_{eficaz}}$ Tensão eficaz na rede elétrica.

X_{Lg} Impedância do indutor de conexão com a rede.

$f(x), g(x)$ Campos vetoriais suaves.

L_f Derivada de Lie de $f(x)$.

L_g Derivada de Lie de $g(x)$.

δ Ângulo de transferência de Potência.

I. INTRODUÇÃO

Os impactos e as preocupações com a interferência humana no meio ambiente são alguns dos fatores que estão contribuindo para a mudança no cenário tradicional da geração de energia elétrica. A geração tradicional, em geral, utiliza processos que podem emitir muitos poluentes (queima de combustível fóssil e mineral), os quais podem causar grandes impactos ao meio ambiente, trazer riscos elevados em caso de desastres (nuclear, grandes usinas hidroelétricas) ou produzir resíduos de elevada vida média para serem degradados naturalmente.

Por outro lado, o crescimento populacional, a necessidade da expansão industrial e comercial são fatores que determinam a ampliação da geração e da oferta de energia elétrica e requerem melhorias nos processos e nas técnicas de geração, transmissão e distribuição da energia elétrica.

Artigo submetido em 16/11/2013. Primeira revisão em 09/02/2014. Aceito para publicação em 15/02/2014, por recomendação do Editor Henrique A. C. Braga.

Estima-se que no ano de 2030 o consumo global de energia elétrica seja 50% maior que no ano de 2008 [1].

Neste contexto, a geração distribuída (GD) vem ganhando cada vez mais destaque no cenário mundial. Na GD propõe-se a integração de fontes alternativas e renováveis de energia elétrica (solar, eólica, célula combustível, entre outras), interligando-as com as redes tradicionais de distribuição de energia elétrica (RDEE) [2-5].

Normalmente, na GD as fontes alternativas e renováveis de energia elétrica estão conectadas em um barramento CC, ao passo que as convencionais RDEE são em CA. Conseqüentemente, para a conexão com tais RDEE há a necessidade de realizar a conversão da fonte de tensão CC para CA, além disso, é necessária a sincronização da tensão CA da GD com a tensão da RDEE. Neste sentido, o VSI é a topologia mais utilizada para esta finalidade. Basicamente, como elemento de conexão, pode-se utilizar diversos arranjos com indutores e capacitores com o propósito de filtrar conteúdos de alta frequência e fornecer para a rede uma forma de onda de corrente mais próxima de uma senoidal, sendo que os dois arranjos mais utilizados é o filtro L e o filtro LCL.

Desta forma, é muito típico na Eletrônica de Potência o uso de técnicas de controle com o objetivo de rastrear uma referência, e. g., impor um rastreamento de tensão senoidal na saída de um VSI. Para este processo de rastreamento, os controladores do tipo PI e PID são amplamente utilizados, sendo que estes controladores satisfazem os critérios de projeto para a maioria dos problemas de engenharia [6].

A solução tradicionalmente, adotada para estes tipos de sistemas é a modelagem por valores médios do sistema, sendo que, logo após aplica-se a análise para pequenos sinais, linearizando o sistema em torno de um ponto quiescente de operação. A partir do modelo linearizado aplicam-se as técnicas de controle linear para a obtenção do controlador para o modelo obtido [7].

A teoria de sistemas lineares é mais simples, mais conhecida e mais difundida no projeto de controladores, porém, o desempenho do sistema é reduzido ao passo que se afasta do ponto quiescente de operação projetado.

Uma forma de contornar as limitações da modelagem de controle para sistemas lineares é a utilização das técnicas de controle para sistemas não-lineares (controle à estrutura variável, modo deslizante, controle adaptativo, redes neurais, linearização pela realimentação dos estados, entre outros) [8].

A linearização por realimentação dos estados utiliza uma malha de realimentação que pode converter o sistema não linear em um sistema linear, permitindo o controle linear do sistema. Busca-se, neste tipo de abordagem, minimizar os principais efeitos das não-linearidades presentes no sistema a ser controlado, permite a utilização tanto de controladores lineares, quanto não lineares. Uma desvantagem é a sensibilidade aos parâmetros envolvidos no processo, que pode impedir a compensação exata de uma possível não linearidade do sistema [8-9].

Atualmente, há uma grande utilização das técnicas de controle robusto utilizando a LMI como possível solução para diversas aplicações que envolvam controle; uma vez que rejeição a perturbações e incertezas politópicas podem ser

consideradas durante a elaboração do problema, de forma a garantir que o sistema de controle tenha robustez [10-14].

As técnicas de LMIs aliadas ao critério da D-Estabilidade podem ser uma ferramenta poderosa para a alocação de pólos em um sistema em malha fechada com realimentação dos estados. O critério da D-Estabilidade delimita a taxa de decaimento máximo para o sistema, através da norma do vetor [13-14].

Neste contexto, este trabalho propõe o controle da injeção de potência ativa, permitindo a funcionalidade de capacidade de compensação de reativos na RDEE, utilizando o FB-VSI-LCL para integrar a GD num determinado ponto de acoplamento comum (PCC - *Point of Common Coupling*) da RDEE. O inversor é controlado como fonte de tensão, utilizando-se as técnicas de controle não-linear, linearização pela realimentação dos estados, em conjunto com técnicas de controle robusto, LMI e critérios da D-Estabilidade, para a obtenção dos controladores, através de uma metodologia de projeto.

Na seção II é apresentado o FB-VSI-LCL e as técnicas de controle são demonstradas; os resultados experimentais são apresentados na seção III e na seção IV são apresentadas as conclusões e considerações finais.

II. TÉCNICA DE CONTROLE

A técnica de controle proposta tem o objetivo de controlar a injeção de potência ativa e permitir o auxílio na compensação de potência reativa da RDEE com geradores distribuídos. A Figura 1 ilustra o controle multimalha proposto para o FB-VSI-LCL.

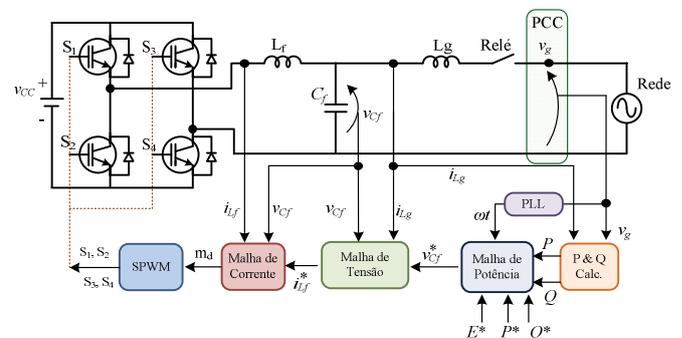


Fig. 1. Controle multimalha para o FB-VSI-LCL conectado a uma rede em CA.

Através das equações tradicionais de P (1) e Q (2) obtém-se a tensão senoidal a ser rastreada pelo capacitor C_f , com a malha de tensão obtém-se a corrente de referência para o indutor L_f e com a malha de corrente obtém-se a modulação PWM senoidal para o FB-VSI-LCL [14,16-18]. As técnicas de LMI em conjunto com critérios de D-estabilidade e linearização por realimentação dos estados são empregadas nas malhas de controle, com a finalidade de melhorar a resposta dinâmica do controlador e minimizar os efeitos não-lineares do sistema.

$$P = \frac{V_{Cf\text{eficaz}} \cdot V_{g\text{eficaz}}}{X_{Lg}} \cdot \sin(\delta) \quad (1)$$

$$Q = \frac{V_{Cf\text{eficaz}} \cdot V_{g\text{eficaz}}}{X_{L_g}} \cdot \cos(\delta) - \frac{V_{g\text{eficaz}}^2}{X_{L_g}} \quad (2)$$

Onde $V_{Cf\text{eficaz}}$ é a tensão eficaz do VSI, $V_{g\text{eficaz}}$ é a tensão eficaz da RDEE, X_{L_g} é a impedância de conexão com a RDEE e δ é o ângulo de transferência de potência.

Utilizou-se a modulação SPWM unipolar com o objetivo de minimizar o conteúdo harmônico e reduzir o tamanho/volume do filtro LCL, quando comparado com a modulação bipolar. A tensão gerada pela malha de potência é sincronizada com a tensão da RDEE através de um PLL (*Phase-Locked-Loop*) [19].

O circuito elétrico apresentado na Figura 1 pode ser simplificado, de forma a possibilitar uma melhor análise do sistema, conforme ilustra a Figura 2. Usando as leis básicas de circuitos elétricos, podem-se obter as principais equações para o FB-VSI-LCL (3), (4) e (5).

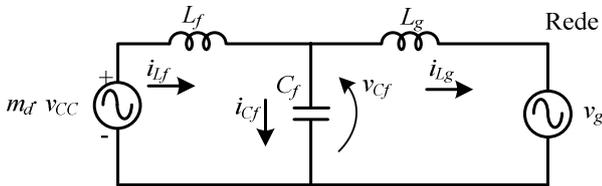


Fig. 2. Circuito elétrico equivalente da Figura 1.

$$\frac{di_{L_f}}{dt} = \frac{m_d \cdot v_{cc} - v_{Cf}}{L_f} \quad (3)$$

$$\frac{di_{L_g}}{dt} = \frac{v_{Cf} - v_g}{L_g} \quad (4)$$

$$\frac{dv_{Cf}}{dt} = \frac{i_{L_f} - i_{L_g}}{C_f} \quad (5)$$

A. Realimentação pela linearização dos estados

Um sistema é dito não-linear [8] quando a saída não varia linearmente com a entrada e pode ser descrito, como:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases}, \quad (6)$$

onde $x \in \mathfrak{R}^n$ representa o vetor de estados, $u \in \mathfrak{R}^m$ representa o vetor de entrada, $y \in \mathfrak{R}^p$ é o vetor de saída, $f(x)$ e $g(x)$ são campos vetoriais suaves definidos no subconjunto aberto no domínio \mathfrak{R}^n , $h(x)$ é uma função escalar e representa uma função não-linear.

Verifica-se que a equação (6) que representa um sistema não-linear, não apresenta de forma explícita a variável de entrada u na equação de saída y . A ideia principal da técnica da linearização por realimentação dos estados é transformar um sistema não-linear em um sistema parcialmente ou totalmente linearizado.

Para tal procedimento, realiza-se a derivada da matriz de saída até notar de forma evidente a parcela de entrada na equação y^{th} (derivada enésima de y). Para tal procedimento matemático, utiliza-se a derivada de Lie (derivada direcional), conforme Definição 1.

Definição 1 (Derivada de Lie): Considerando uma função escalar $h(x)$ e um campo vetorial $f(x)$, define-se a derivada de Lie do campo escalar em função do campo vetorial como [8,9]:

$$L_f h(x) = \frac{\partial h}{\partial x} f(x) = \Delta h(x) f(x). \quad (7)$$

Aplicando a derivada de Lie em (6) obtém-se:

$$\dot{y} = \frac{\partial h}{\partial x} f(x) + \frac{\partial h}{\partial x} g(x)u \quad (8)$$

$$\dot{y} = L_f h(x) + L_g h(x)u. \quad (9)$$

Onde $L_f h(x) : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ e $L_g h(x) : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$.

Caso $L_g h(x) = 0$, deve-se continuar derivando y até a entrada u aparecer explicitamente. Desta forma, pode-se definir de forma repetitiva as derivadas de Lie, de forma recursiva, como (10) e (11):

$$L_f^i h(x) = L_f [L_f^{i-1} h(x)] = \nabla [L_f^{i-1} h(x)] f(x) \quad (10)$$

$$L_g L_f^i h(x) = L_g [L_f^i h(x)] = \nabla [L_f^i h(x)] g(x). \quad (11)$$

Se o grau relativo for igual ao grau do sistema, diz-se que o sistema é observável e pode ser controlado, e há uma linearização do sistema. Se o grau relativo for menor que o grau do sistema, diz-se que o sistema é não observável, e o sistema precisará ser analisado para a aplicação do método [9].

Se $L_g L_f^{r-1} h(x) \neq 0$ para algum valor quando $x = x_0$ no domínio Ω_0 , observa-se que a relação linear também é verificada para uma vizinhança finita de Ω em x_0 . Assim, o sistema pode ser reescrito como:

$$y^r = L_f^r h(x) + L_g L_f^{r-1} h(x)u \quad (12)$$

A partir de (12) pode-se apresentar o sistema em função da variável de controle como (13):

$$u = \frac{[-L_f^r h(x) + z]}{L_g L_f^{r-1} h(x)}. \quad (13)$$

A relação entre a entrada e a saída do sistema pode ser reescrita como (14):

$$y^r = z. \quad (14)$$

B. LMI e D-estabilidade

Um sistema linear, invariante no tempo e controlável pode ser representado em função das variáveis de estados:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) = Cx(t). \end{cases} \quad (15)$$

Onde $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$, $x(t) \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de estados, $y(t) \in \mathbb{R}^p$ é a saída de interesse e $u(t) \in \mathbb{R}^m$ é a entrada de controle.

Considerando que o sistema (15) esteja sujeito às leis de controle por realimentação de estados, tem-se:

$$u(t) = -Kx(t), \quad (16)$$

onde $K \in \mathbb{R}^{m \times n}$ representa a matriz de ganho da realimentação dos estados.

Um sistema em malha fechada e invariante no tempo pode ser representado por:

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t). \quad (17)$$

Pesquisas envolvendo a aplicação das desigualdades matriciais lineares na solução de problemas de otimização convexa vêm ganhando cada vez mais destaque no cenário global [10-14]. Uma interessante aplicação da LMI é a alocação de pólos de um sistema em malha fechada em uma determinada região do plano-s, conforme ilustra a Figura 3 [13-14]. Na Tabela I são apresentados os principais parâmetros utilizados para definir a região $S(\gamma, \sigma, \tau, \theta)$, com a finalidade de alocar pólos no sistema de malha fechada.

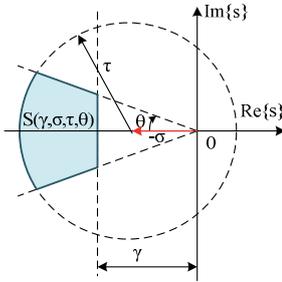


Fig. 3. LMI - Região do Plano $S(\gamma, \sigma, \tau, \theta)$.

De uma forma geral, o conceito da D-estabilidade tem o propósito de solucionar a matriz de realimentação de estados K para a alocação de polos (17) no semiplano esquerdo da região $S(\gamma, \sigma, \tau, \theta)$, definida previamente [7-10].

TABELA I

Descrição dos parâmetros da região $S(\gamma, \sigma, \tau, \theta)$

Parâmetros	Descrição
θ	Restringe a parte imaginária dos pólos alocados, refletindo no sobressinal e no amortecimento da resposta transitória.
γ	Limite inferior para o módulo dos pólos alocados, garantindo assim um tempo de estabelecimento máximo para a resposta transitória.
σ, τ	Limite superior para o módulo dos pólos alocados, de modo a evitar controladores com ganhos elevados.

Segundo Lyapunov [10], se a função energia for sempre positiva e nunca for negativa em função do tempo, as trajetórias tendem à origem com o passar do tempo, se a derivada da função energia for negativa. Considerando como uma determinada função candidata à função de Lyapunov, uma função quadrática $v(x) = x'Ux$, com $U = U'$ a determinar, pode-se dizer que:

$$\begin{cases} v(x) = x'Ux > 0, \forall x \neq 0 \Leftrightarrow U > 0, \\ \dot{v}(x) = x'(A'U + UA)x < 0 \Leftrightarrow A'U + UA < 0. \end{cases} \quad (18)$$

Onde $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$.

Determina-se a estabilidade de A encontrando uma solução factível, tal que $U = U' \in \mathbb{R}^{n \times n}$ para o problema (LMI):

$$U > 0; A'U + UA < 0. \quad (19)$$

Definição 2. Considerando que D seja uma região definida no semiplano esquerdo do plano-s (complexo), um sistema representado por $\dot{x}(t) = Ax(t)$ é considerado D-estável se e somente se todos os pólos do sistema em malha fechada estão alocados dentro da região D , ou seja, todos os autovalores de A pertencem à região D .

Proposição. Uma matriz A de um sistema SLIT (Sistema Linear e Invariante no Tempo) (15) sujeito à lei de controle (16) é dito $S(\gamma, \sigma, \tau, \theta)$ estável, se e somente se, existe uma matriz U simétrica verificando o seguinte conjunto de LMI:

$$\begin{aligned} &U > 0, \\ &AU + UA' - BY - Y' B' + 2\gamma U < 0, \\ &\begin{bmatrix} -\tau U & AU - BY + \sigma U \\ UA' - Y' B' + \sigma U & -\tau U \end{bmatrix} < 0, \\ &\begin{bmatrix} \sin(\theta) \cdot (AU + UA' - BY - Y' B') & \cos(\theta) \cdot (AU - UA' - BY + Y' B') \\ \cos(\theta) \cdot (UA' - AU + BY - Y' B') & \sin(\theta) \cdot (UA' + AU - BY - Y' B') \end{bmatrix} < 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Se (20) for factível, então uma matriz de realimentação de estados K que aloca os pólos de malha fechada na região $S(\gamma, \sigma, \tau, \theta)$ será dada por $K = YU^{-1}$, onde U é uma matriz simétrica e Y é uma matriz que satisfaz os conjuntos das LMIs.

A taxa de decaimento (γ) é determinada, na literatura, em conjunto com o tempo máximo de estabelecimento (t_e) [10], conforme:

$$\lim_{t_e \rightarrow \infty} e^{-\gamma t_e} \|x\| = 0, \quad (21)$$

sendo x o vetor de estados. Assim, pode-se determinar o tempo de estabelecimento em função da taxa de decaimento conforme:

$$t_e = \frac{6}{\gamma}. \quad (22)$$

C. Controle Multimalthas

1) Malha de Corrente

A malha de corrente é responsável por gerar a razão cíclica, assim deve ser a malha mais rápida do sistema. Conseqüentemente, o objetivo do controlador é garantir que a corrente i_{L_f} siga a referência $i_{L_f}^*$, que é gerada pela malha externa de tensão. O erro entre a corrente de referência e a corrente de saída do inversor pode ser obtido por:

$$e_i = i_{L_f}^* - i_{L_f}. \quad (23)$$

Aplicando a linearização pela realimentação dos estados em (23), obtém-se:

$$\dot{e}_i = \frac{di_{L_f}^*}{dt} - \frac{di_{L_f}}{dt}. \quad (24)$$

Substituindo (3) em (24) e readequando os termos, a razão cíclica pode ser obtida, conforme:

$$d = z_i + \frac{L_f \frac{di_{L_f}^*}{dt} + L_f v_{C_f}}{v_{CC}}. \quad (25)$$

O termo \dot{e}_i é não linear e representa a dinâmica do erro da malha de corrente. O termo z_i é introduzido em (25) com a finalidade de linearizar o sistema, dado por:

$$\dot{e}_i = -z_i v_{CC} / L_f. \quad (26)$$

Analisando (25), a proposta de controle introduz no sistema estados de realimentação (v_{C_f}), melhorando as

dinâmicas da malha e atenuando possíveis perturbações que venham a ocorrer na tensão de entrada e de saída.

2) Malha de Tensão

A malha de tensão é responsável por gerar a corrente de referência $i_{L_f}^*$. A frequência de cruzamento desta malha deve ser superior à frequência da rede e inferior à da malha de corrente, caso contrário, poderão ocorrer distorções harmônicas na tensão e interferências nas dinâmicas da malha de corrente.

O objetivo principal desta malha é rastrear uma tensão senoidal $v_{C_f}^*$, gerada pela malha de potência, impondo a referência para a tensão sobre o capacitor C_f . O erro de entrada da malha de tensão pode ser definido por:

$$e_v = v_{C_f}^* - v_{C_f}. \quad (27)$$

Aplicando a linearização pela realimentação dos estados em (27), substituindo (5), a corrente de referência pode ser obtida por (28) e (29).

$$i_{L_f}^* = z_v + i_{L_g} + C_f \frac{dv_{C_f}^*}{dt} \quad (28)$$

$$\dot{e}_v = -\frac{z_v}{C_f} \quad (29)$$

Os termos z_i e z_v tratam da linearização da derivada do erro de corrente e de tensão, respectivamente. Os projetos dos controladores de corrente e de tensão serão realizados nestes pontos linearizados, conforme processo descrito no item D.

3) Malhas de Potências Ativa e Reativa

A malha de potência ativa tem a função de rastrear o ângulo de transferência de potência (δ). A magnitude da tensão é obtida através da diferença entre as potências reativas de referência e a compensada para a rede. É possível transferir potências elevadas com valores pequenos do ângulo δ . Desta forma, (1) e (2) podem ser simplificados, conforme (30) e (31).

$$P = \frac{V_{C_f \text{ eficaz}} V_{g \text{ eficaz}}}{X_{L_g}} \cdot \delta \quad (30)$$

$$Q = \frac{V_{C_f \text{ eficaz}} V_{g \text{ eficaz}}}{X_{L_g}} - \frac{V_{g \text{ eficaz}}^2}{X_{L_g}} \quad (31)$$

Os erros na malha de potência ativa e reativa são dados por (32) e (33), respectivamente.

$$e_p = P^* - P \quad (32)$$

$$e_Q = Q^* - Q \quad (33)$$

Aplicando a linearização pela realimentação dos estados em (32) e (33), utilizando (30) e (31), pode-se obter o ângulo de transferência de potência e a variação de amplitude, necessários para transferir P e Q desejado para a rede elétrica, conforme (34) e (35), respectivamente.

$$\delta = \frac{1}{V_{C_f \text{ eficaz}}} \int z_p dt \quad (34)$$

$$\Delta v_{C_f} = \int z_Q dt \quad (35)$$

Onde:

$$\dot{e}_p = -\frac{z_p V_{g \text{ eficaz}}}{X_{L_g}} e \quad (36)$$

$$\dot{e}_Q = -\frac{z_Q V_{g \text{ eficaz}}}{X_{L_g}} \quad (37)$$

Assim, a tensão de referência é obtida conforme:

$$v_{C_f}^* = \sqrt{2} (E^* + \Delta v_{C_f}) \sin(\omega t + \delta), \quad (38)$$

onde E^* é a referência de tensão eficaz, neste trabalho considerado como 127 V.

D. Projeto dos Controladores

As dinâmicas apresentadas em (26), (29), (36) e (37) são lineares. Como o sistema foi linearizado, pode-se utilizar diferentes tipos de controladores, e.g., PI, PID, avanço-atraso, polinomial, entre outros. Para este trabalho definiu-se o uso de controlador PI, com a finalidade de realizar o rastreamento da referência desejada [14, 15]. Desta forma, o termo z_α pode ser reescrito em função do controlador PI, conforme:

$$z_\alpha = K_{\alpha 1} e_\alpha + K_{\alpha 2} \int e_\alpha dt, \quad (39)$$

onde o termo α representa as malhas de corrente, tensão, potência ativa e reativa.

O ganho proporcional e integral precisa ser maior que zero, ou seja, $K_{\alpha 1} > 0$ e $K_{\alpha 2} > 0$, possibilitando que (39) seja reescrito conforme:

$$\dot{e}_\alpha = -\frac{K_{\alpha 1}}{G_\alpha} \cdot e_\alpha - \frac{K_{\alpha 2}}{G_\alpha} \cdot w_\alpha, \quad (40)$$

onde:

$$w_\alpha = \int e_\alpha \cdot dt \quad (41)$$

Assim, a matriz de realimentação K pode ser obtida rearranjando (40) e (41) no formato de (17), conforme:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_\alpha \\ \dot{w}_\alpha \end{bmatrix} = (A_\alpha - B_\alpha K_\alpha) \begin{bmatrix} e_\alpha \\ w_\alpha \end{bmatrix}, \quad (42)$$

onde:

$$A_\alpha = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, B_\alpha = \begin{bmatrix} 1/G_\alpha \\ 0 \end{bmatrix}, K_\alpha = [K_{\alpha 1} \quad K_{\alpha 2}]. \quad (43)$$

O termo G_α representa o ganho do erro no controle multimalha.

III. RESULTADOS

O trabalho proposto foi implementado experimentalmente, para efeitos de aplicação prática e para a demonstração do controle proposto para o FB-VSI-LCL. O controle foi implementado digitalmente utilizando a plataforma dSPACE ACE1104, sendo que, para a estrutura de potência foi utilizado um módulo da Semikron (IGBT SKM50GB123D, diodo retificador SKKD 46/12, circuito de ataque SKHI 22A e barramento CC de 2,2mF/900V), conforme Figura 4.

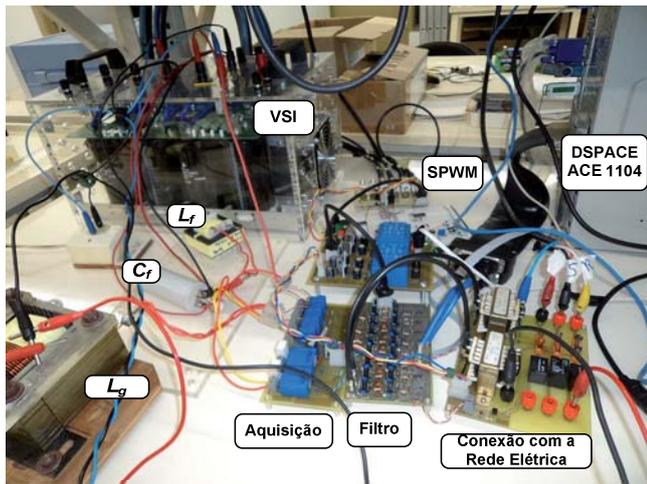


Fig. 4. Montagem Experimental.

Na Tabela II são apresentados os principais parâmetros utilizados no FB-VSI-LCL.

TABELA II
Parâmetros de Projeto

Parâmetros	Valores
Tensão Média de Entrada	$v_{CC}=300V$
Tensão Eficaz da rede	$V_{g\text{eficaz}}=127V$
Frequência da rede	$f_0=60\text{Hz}$
Potência Nominal de Saída	$S=1000VA$
Frequência de Chaveamento	$f_s=9,9\text{kHz}$
Indutor de filtro	$L_f=0,5\text{mH}$
Indutor de conexão com a rede	$L_g=20\text{mH}$
Capacitor de filtro	$C_f=5\mu F$

Os ganhos dos controladores (20) foram determinados utilizando o MatLab, em conjunto com YALMIP [20] para alocação dos pólos na matriz de realimentação de estados. A Tabela III exibe os ganhos dos controladores para as malhas de potências ativa e reativa, de tensão e de corrente. A escolha dos parâmetros levou em conta o FB-VSI-LCL (Tabela II) e as dinâmicas necessárias para cada malha. Os controladores foram discretizados pelo método trapezoidal (*tustin*), considerando uma frequência de amostragem de 15kHz.

TABELA III
Parâmetros de Projeto para os Controladores

Malha	Parâmetros para a região $S(\gamma, \sigma, \tau, \theta)$				Controlador PI	
	γ	σ	τ	θ	K_p	K_q
Potência ativa	60	0	60,9	2	1,794	54,265
Potência reativa	24	0	27,6	2	0,77	9,96
Tensão	4500	0	6750	1	0,056	150,373
Corrente	21000	0	26250	2	0,063	732,775

Os sinais de correntes e tensões adquiridos passaram por um filtro passa-baixa de primeira ordem, com a finalidade de filtrar frequências elevadas (chaveamento e ruídos). A modulação SPWM é realizada externamente ao dSPACE, o sinal de saída do controle foi enviado através de conversores D/A, e, utilizando amplificadores operacionais (LF 351) gerou-se os sinais SPWM para o FB-VSI-LCL. Foi desenvolvida uma interface gráfica do usuário (GUI - *Graphical User Interface*) com a finalidade de controlar e

gerenciar o funcionamento do inversor: controlar a conexão com a rede, controlar o fluxo de potências ativa e reativa e registrar o fluxo de potências entre a GD e a RDEE, conforme ilustra a Figura 5.

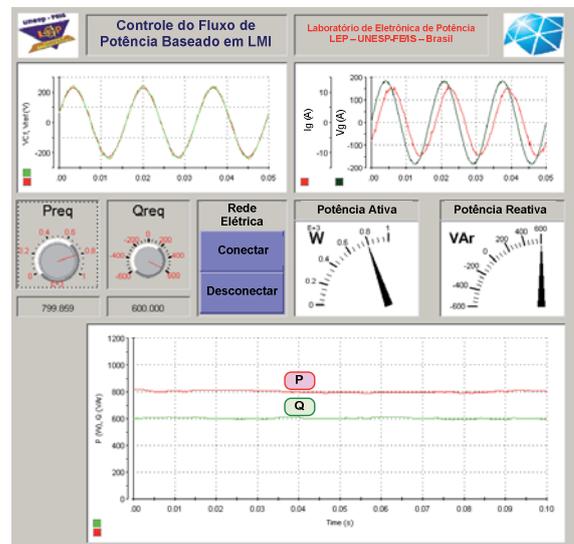


Fig. 5. GUI Para Gerenciamento e Monitoramento do FB-VSI-LCL em Conexão com a Rede Elétrica em CA.

A Figura 6 ilustra a injeção de potência ativa de 1000W (nominal) na rede CA. O conteúdo harmônico da corrente injetada na rede pode ser visualizado na Figura 7. Observa-se que a corrente apresenta baixo conteúdo harmônico, apresentando uma DHT de 2,4%, com fator de potência de 0,993.

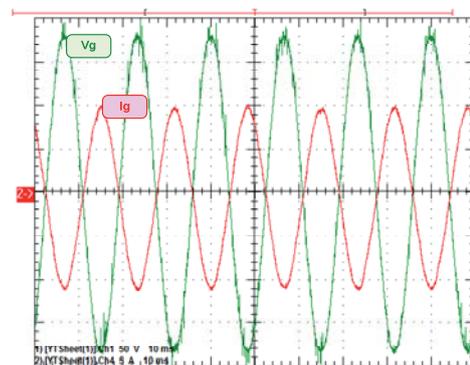


Fig. 6. Injeção de Potência Ativa na Rede de 1000W (Nominal) com 2,4% de DHT. Vg: 50V/div; Ig: 5A/div; Tempo: 10ms/div.

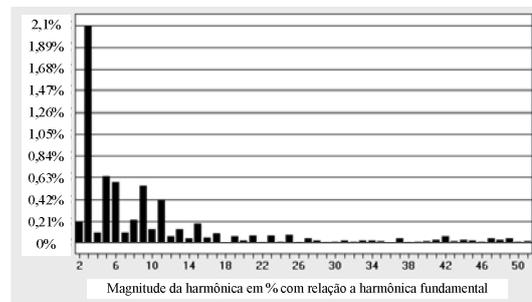


Fig. 7. Conteúdo Harmônico da Corrente Injetada (Figura 6).

A variação de potência ativa considerando uma variação de 0 para 1000W é ilustrada na Figura 8. Observa-se que

durante a análise da potência ativa a funcionalidade de compensação de reativos foi mantida constante e igual a zero.

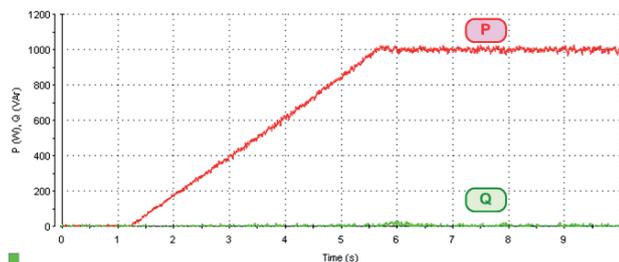


Fig. 8. Controle da Potência Ativa, variação de 0 até 1000 W.

A funcionalidade de compensação de reativos é ilustrada na Figura 9, onde ocorre a variação controlada de -600var até 550var, sendo que, durante a variação da compensação de reativos a potência ativa foi considerada constante e igual a 800W.

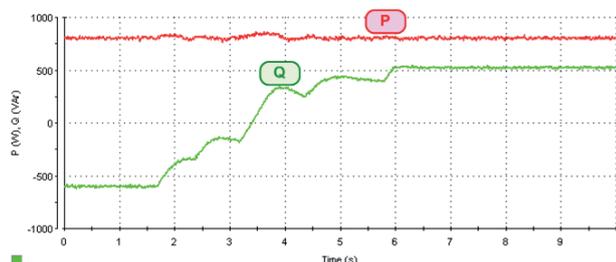


Fig. 9. Compensação de Reativos, variação de -600var a 550var.

Na Figura 10 é ilustrada a injeção de 800W de potência ativa e 600var de compensação de reativos. A Figura 11 ilustra a injeção de 800W de potência ativa e a compensação de -600var de reativos. Em ambas as situações a potência aparente foi de 1000VA.

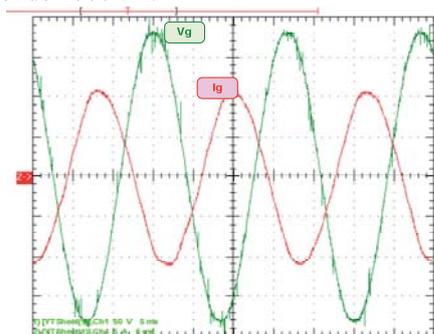


Fig. 10. Injeção de Ativo (800W) e Compensação de Reativos (600var) na Rede Elétrica com 2,6 % de DHT de corrente. Vg: 50V/div; Ig: 5A/div; Tempo: 5ms/div.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia de projeto de controladores utilizando LMI e conceitos de D-Estabilidade para a alocação de pólos em malha fechada no plano-s para o inversor monofásico em ponte completa com filtro LCL, para aplicação em geração distribuída conectada à rede elétrica em CA. O sistema multimalhas proposto foi linearizado através de uma técnica de controle não-linear, a linearização pela realimentação dos estados. O FB-VSI-LCL foi controlado no modo tensão, sendo que a injeção de potência

ativa e a funcionalidade de compensação de reativos foram realizadas com base nas equações P-f e Q-V.

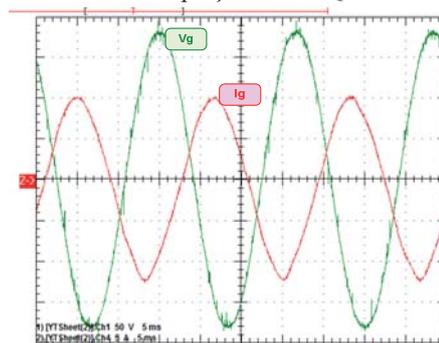


Fig. 11. Injeção de Potência Ativa (800W) e Compensação de Reativos (-600var) na Rede Elétrica com 3,8% de DHT. Vg: 50V/div; Ig: 5A/div; Tempo: 5ms/div.

O trabalho propôs o projeto de controladores com baixos valores de ganhos, exigindo baixos esforços computacionais, garantido que o controle funcionasse com uma frequência de amostragem de 15kHz.

Os resultados experimentais comprovam o funcionamento do controle proposto. O sistema multimalhas possibilita o controle do fluxo de potências ativa e reativa entre o inversor e a rede elétrica, com reduzidas distorções harmônicas.

Portanto, o controle desenvolvido obtém de forma eficaz e robusta o ganho proporcional e integral para os controladores propostos, utilizando LMI e D-Estabilidade, dentro da região esquerda do semiplano s. Além disso, a proposta de controle apresenta o benefício da inserção de estados de realimentação, proporcionando um aumento na dinâmica das malhas, além de atenuar possíveis perturbações e interferências que possam ocorrer no sistema.

Finalmente, há de se observar e destacar que a funcionalidade auxiliar de compensação reativa para os inversores associados aos sistemas de GD, será estratégica para o cenário futuro da garantia dos indicadores de Qualidade de Energia (QEE) das RDEE com forte penetração de GD, assim como, fundamental para a possibilidade de operação ilhada destes GD em ambiente de microrredes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP, CAPES, CNPq e Semikron pelo suporte financeiro para o desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] REN21 – “Renewable Energy Policy Network for 21st Century”. Renewables 2011: Global status report. Belgium, 2010. Available from: <http://www.ren21.net>.
- [2] M. A. G. Brito, L. P. Sampaio, G. A. e Melo, C. A. Canesin, “Contribuição Ao Estudo Dos Principais Algoritmos de Extração da Máxima Potência dos Painéis Fotovoltaicos”, *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, vol. 17, no. 3, pp. 592-600, agosto 2012.
- [3] A. Consoli, M. Cacciato, V. Crisafulli, “Power Converters for Photovoltaic Generation Systems in Smart Grid Applications”, *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, vol. 14, no. 4, pp. 251-257, dezembro 2009.

- [4] R. H. Lasseter, "Smart Distribution: Coupled Microgrids", *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 1074-1082, June 2011.
- [5] R. B. Godoy, H. Z. Maia, F. J. Teixeira Filho, L. Galotto Junior, J. O. P. Pinto, G. S. Tatibana, "Projeto e Desenvolvimento de um Sistema Inversor para Fontes de Energia Renovável com Conectividade à Rede Elétrica", *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, vol. 12, no. 2, pp. 155-162, julho 2007.
- [6] L. P. Sampaio, M. A. G. de Brito, L. Galotto Junior, G. de A. Melo and C. A. Canesin, "Single-phase current-source-boost inverter for renewable energy sources," in *Proc. of ISIE*, pp.1118-1123, 2011.
- [7] R. W. Erickson, D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*, Kluwer Academic Publisher, 2nd Edition, USA, 2001.
- [8] A. Isidori, *Nonlinear control systems*, 3rd Edition, 1995.
- [9] M. J. Kurtz, M. A. Henson, "Input-output linearizing control of constrained nonlinear processes", *Journal of Process Control*, vol. 7, no. 1, pp. 3-17, February 1997.
- [10] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, V. Balakrishnan, *Linear matrix inequalities in system and control theory*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 1994.
- [11] C. Olalla, R. Leyva, A. El Aroudi, P. Garces and I. Queinnec, "LMI robust control design for boost PWM converters", *IET Transactions on Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 75-85, January 2010.
- [12] E. Assunção, C. Q. Andrea and M. C. M. Teixeira, "H2 and H ∞ -optimal control for the tracking problem with zero variation", *IET Transactions on Control Theory & Applications*, vol. 1, no. 3, pp. 682-688, May 2007.
- [13] L. F. S. Buzachero, "Otimização de controladores robustos de sistemas dinâmicos sujeitos a falhas estruturais", MSc. thesis, São Paulo State University – FE/IS UNESP 2010.
- [14] L. P. Sampaio, M. A. G. de Brito, M. G. Alves, G. A e Melo, C. A. Canesin, "Robust Control Applied to Power Flow Control in Single-Phase Inverter with LCL Filter, using Droop Control and D-stability", in *Proc. of INDUSCON*, pp.1-8, 2012.
- [15] G. Chu, C.K. Tse, Siu Chung Wong, Siew-Chong Tan, "A Unified Approach for the Derivation of Robust Control for Boost PFC Converters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 11, pp. 2531-2544, November 2009.
- [16] R. B. Godoy, C. A. Canesin, J. O. P. Pinto, A. M. A. C. Pinto, E. A. A. Coelho, "Differential Evolution Based Optimization of the Dynamic Response for Parallel Operation of Inverters with no Controllers Interconnection", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 7, pp. 2859-2866, July 2012.
- [17] R. B. Godoy, L. A. Carniato; J. O. P. Pinto, C. A. Canesin, R. Cordero, "Power flow optimization for grid connected inverter using evolutionary algorithm and additional control loop", in *Proc. of COBEP*, pp. 422-427, 2011.
- [18] R. B. Godoy, J. O. P. Pinto, C. A. Canesin, "Optimized Parallelism of Two Single Phase Inverters Based on Evolutionary Theory", in *Proc. of SPEEDAM*, pp. 1135-1140, 2010.
- [19] F. P. Marafão, Si. M. Deckmann, J. A. Pomilio, R. Q. Machado, "Metodologia De Projeto E Análise De Algoritmos De Sincronismo PII", *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, vol. 10, no. 1, pp. 7-14, junho 2005.
- [20] J. Lofberg, "YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB", in *Proc. of CACSD*, 2004, pp. 284-289, 2004.

DADOS BIOGRÁFICOS

Leonardo Poltronieri Sampaio, nascido em São José do Rio Preto (SP), em 1983. É engenheiro eletrcista (2008), mestre (2010) e doutor (2013) pela Universidade Estadual Paulista - UNESP-FE/IS, em Ilha Solteira (SP). Atualmente é professor na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR no Campus de Cornélio Procópio - Paraná. Suas áreas de interesse são: energias alternativas e renováveis, ferramentas educacionais, controle de conversores estáticos, inversores isolados e em conexão com a rede de distribuição de energia elétrica.

Moacyr Aureliano Gomes de Brito, nascido em Andradina (SP), em 1982. É engenheiro eletrcista (2005), mestre (2008) e doutor (2013) pela Universidade Estadual Paulista – UNESP-FE/IS, em Ilha Solteira (SP). Atualmente é professor na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR no Campus de Campo Mourão - Paraná. Suas áreas de interesse são: reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes, controle de luminosidade, técnicas de correção ativa do fator de potência, controle digital e conversores CC-CC, uso de DSPs e FPGAs, inversores isolados e em conexão com a rede de distribuição de energia elétrica.

Guilherme de A. e Melo, nascido em Presidente Prudente (SP), em 1976, é engenheiro eletrcista (2001), mestre (2006) e doutor (2010) pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Atualmente é professor colaborador da Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Suas principais áreas de interesse incluem qualidade da energia elétrica, correção ativa do fator de potência, energias renováveis, conversores CC-CC e CA-CC e sistemas de controle digital.

Carlos Alberto Canesin, nascido em Lavínia (SP), em 1961, é engenheiro eletrcista (1984) pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP-FE/IS), mestre (1990) e doutor (1996) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC INEP, Florianópolis-SC. Atualmente é professor titular do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UNESP-FE/IS. Foi editor geral da Revista Eletrônica de Potência (gestão 2003-2004), ex-presidente da SOBRAEP – Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (gestão 11/2004 – 10/2006), é editor associado da IEEE Transactions on Power Electronics. Suas áreas de interesse incluem técnicas de comutação não-dissipativa, conversores CC-CC, técnicas de correção ativa do FP, retificadores e inversores, aplicações das energias renováveis, reatores para iluminação e técnicas modernas para o ensino de eletrônica de potência.