

Seleção Ótima da Tensão de Modo Comum para Conversores NPC

Vítor Paese De Carli

5 de julho de 2024

1 Introdução

O conversor estático proposto é um inversor NPC trifásico a três fios que deverá atuar como formador de rede. Isto é, o conversor deve ter a capacidade de operar em modo ilhado e também conectado a rede elétrica convencional. Quando em modo ilhado, o seu objetivo é imitar o comportamento de um gerador síncrono, permitindo gerar a referência de tensão e frequência da microrrede (MR) a qual ele está submetido. Por outro lado, quando estiver conectado a rede da concessionária, as referências de tensão e frequência serão impostas pela rede externa, portanto o conversor deverá atuar controlando a sua potência exportada ou importada. Verifique na Figura 1 a topologia da MR.

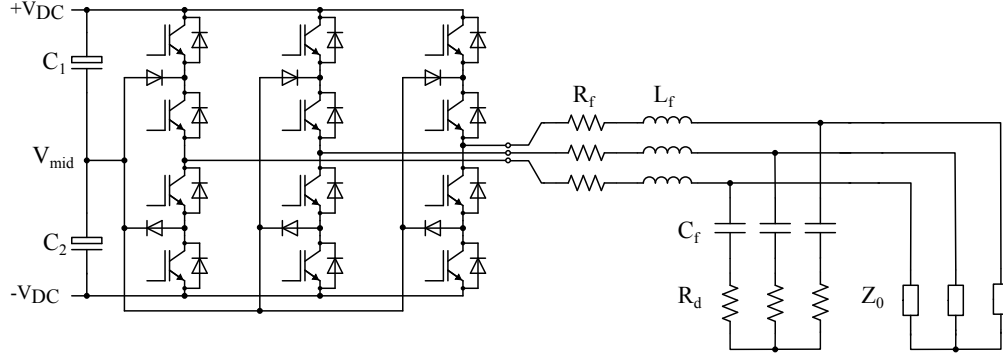


Figura 1: Topologia do Inversor Proposto.

Para atingir tal objetivo, o conversor é alimentado por um *Battery Energy Storage System* (BESS) através de um barramento de tensão contínua. Por sua vez, essa energia deverá ser transformada por meio da comutação das chaves de potência de modo a promover o rastreamento de uma referência de tensão senoidal sobre o capacitor do filtro LC.

2 Especificações do Sistema

Com o intuito de restringir as condições de contorno da aplicação, uma pesquisa foi promovida para encontrar estudos de caso similares [1]. Através desta análise, foram identificados parâmetros críticos, como a tensão do barramento, indutância e capacitância do filtro.

Estes parâmetros foram selecionados para otimizar a eficiência e a estabilidade do conversor, garantindo sua operação adequada tanto em modo ilhado quanto conectado à rede. O divisor capacitivo foi tomado com capacitâncias relativamente baixas para a potência do inversor, isto porque a seleção de uma baixa capacitância evidencia o benefício da malha de controle da tensão no ponto central do divisor capacitivo que será exposta mais adiante. As especificações do sistema são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Especificações do Sistema.

Descrição	Símbolo	Valor
Potência Nominal	S_{nom}	225 kVA
Tensão do Barramento CC	V_{DC}	1000 V
Capacitância do Divisor Capacitivo	$C_{1,2}$	1500 μ F
Indutância do Filtro	L_f	0.5 mH
Resistência Série do Indutor	L_f	0.05 Ω
Capacitância do Filtro	C_f	150 μ F
Resistência de Amortecimento	R_d	0.1 Ω
Tensão Nominal da Rede	V_{grid}	440 V
Frequência Nominal da Rede	f_{grid}	60 Hz
Frequência de Chaveamento	f_{sw}	20 kHz
<i>Deadtime</i>	t_{dead}	50 ns

3 Método de Modulação

Em [2], é proposto um método de seleção da tensão de modo comum para inversores de topologia NPC e *T-Type*. O método consiste na seleção ótima da tensão de modo comum v_0 de modo que seja possível controlar a corrente i_0 através do ponto central dos capacitores do barramento CC. Posteriormente, através do controle de i_0 também é possível rastrear uma referência para a tensão no ponto central V_{c2} . A referência neste caso é exatamente a metade de V_{DC} , garantindo que tensão divida-se igualmente no divisor capacitivo composto pelo capacitores C_1 e C_2 .

O primeiro passo para realização de tal algoritmo, é a transformação dos sinais de interesse para coordenadas $\alpha\beta 0$ através da matriz de transformação invariante em potência exposta em (1).

$$\begin{bmatrix} v_{ag} \\ v_{ag} \\ v_{ag} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \\ v_0 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{abc} \cdot \mathbf{v}_{\alpha\beta 0} \quad (1)$$

Todas tensões de modo comum selecionadas, devem levar a valores de v_{xg} realizáveis, isto é, que estão dentro da faixa de operação do barramento CC.

$$0 \leq \mathbf{v}_{abcn} \leq V_{DC} \quad (2)$$

Resolvendo as inequações para v_0 dadas por (1) e (2), determina-se uma região de solução para a tensão de modo comum pelo encontro de seu limite inferior e superior.

$$\max(c_1, c_2, c_3) \leq v_0 \leq \max(c_4, c_5, c_6) \quad (3)$$

Onde as condições c_n são dadas por:

$$\begin{aligned} c_1 &= -\sqrt{2}v_\alpha \\ c_2 &= \frac{v_\alpha}{\sqrt{2}} - \sqrt{\frac{3}{2}}v_\beta \\ c_3 &= \frac{v_\alpha}{\sqrt{2}} + \sqrt{\frac{3}{2}}v_\beta \\ c_4 &= \sqrt{3}V_{DC} + c_1 \\ c_5 &= \sqrt{3}V_{DC} + c_2 \\ c_6 &= \sqrt{3}V_{DC} + c_3 \end{aligned} \quad (4)$$

Uma vez que a região solução foi definida, o objetivo é encontrar o valor de v_0 que promove a circulação da menor corrente i_0 através do ponto central. O ponto de partida é a definição da expressão que descreve i_0 conforme (5).

$$i_o = \sum_{x \in \{a,b,c\}} 2i_x \left| v_{xg} - \frac{V_{DC}}{2} \right| \quad (5)$$

$$0 = 2 \left(i_a \left| v_{an} - \frac{V_{DC}}{2} \right| + i_b \left| v_{bn} - \frac{V_{DC}}{2} \right| + i_c \left| v_{cn} - \frac{V_{DC}}{2} \right| \right) - i_0 \quad (6)$$

$$0 = f(v_0, i_0) \quad (7)$$

Resumidamente, o objetivo é minimizar o módulo da função em tempo real através da execução recursiva da própria, guardando o valor de f que resultar em f_{min} . Note que a execução recursiva demanda fardo computacional e, portanto, a quantidade de vezes que f deverá ser executada deve respeitar a capacidade do processador que a executa.

Por fim, baseado nos sinais de controle v_α , v_β e no sinal de v_0 obtido, aplica \mathbf{T}_{abc}^{-1} para encontrar o vetor \mathbf{v}_{abc_n} . O vetor em questão consiste nos sinais modulantes que serão comparados com as portadoras do modulador PWM, que no caso, implementa *phase-disposition*.

4 Lei de Controle

O foco do presente trabalho é a modulação do conversor, logo, a apresentação da lei de controle de tensão é sucinta. A lei de controle consiste na execução de uma malha interna de corrente baseada em realimentação de estados através da seleção dos ganhos por DLQR. A malha externa de tensão impõe uma corrente de referência para a malha interna e é baseada na execução de um controlador proporcional-ressonante com realimentação de estados também utilizando DLQR. Para mais detalhes a respeito de tal lei, o leitor deverá tomar conhecimento de [3].

Entretanto, um algoritmo de controle auxiliar deve ser implementado para garantir a convergência da tensão do ponto central para $\frac{V_{DC}}{2}$. A lei é simples e consiste na medição da tensão sobre o capacitor C_2 , da sua comparação com metade de V_{DC} e multiplicação do erro por um ganho proporcional K_p .

A saída da malha consiste na ação de controle dita $i_{0_{ref}}$, portanto a execução da função f passa a ser dada em função da referência de corrente. Isto é:

$$0 = f(v_0, i_{0_{ref}}) \quad (8)$$

5 Simulação

A planta elétrica, modulação e leis de controle anteriormente apresentadas são simuladas em *Virtual Hardware-In-The-Loop* (VHIL) com passo de simulação $0.25 \mu s$. Para atingir modularidade e, portanto, alta portabilidade para microcontroladores, as rotinas implementadas em linguagem C foram desenvolvidas no formato de biblioteca utilizando o recurso de inclusão de *dynamic-linked-libraries* (DLL) do software *Typhoon HIL Control Center* [4].¹

De forma mais específica, a implementação no formato de biblioteca consiste no desenvolvimento de um arquivo de *header* (.h) que contém os protótipos de função e em um arquivo de implementação (.c) que contém o código completo das funções. Dessa forma, a biblioteca validada no VHIL pode ser incluída de forma rápida e segura num microcontrolador. Observe na Tabela 2 o código equivalente que deverá ser incluído na *Interrupt-Service-Routine* para solução da modulação geométrica otimizada.

Tabela 2: Código da Modulação Geométrica Otimizada.

Linha	Código
1	<code>v0 = computeV0(i0, vdc, val, vbe, ia, ib, ic);</code>
2	<code>alphaBetaToAbc_PI(val, vbe, v0, &van, &vbn, &vcn);</code>

6 Resultados

Os resultados foram obtidos para o sistema em modo ilhado, apresentando as variáveis de interesse para diferentes variações de carga e também para constatação do impacto da malha de controle da tensão no ponto central do divisor capacitivo. As subseções a seguir detalham esses resultados.

6.1 Regime Permanente para Diferentes Cargas

Na análise do regime permanente para diferentes cargas, os *subplots* fornecem informações específicas para cada caso: o primeiro quadrante compara a tensão de referência V_0 com a tensão medida V_C ; o segundo mostra a corrente de referência I_{Lf0} em comparação com a corrente medida I_{Lf} ; o terceiro *subplot* exibe a forma de onda da tensão V_{AB} não filtrada; e

¹Código Fonte e Arquivos de Simulação: github.com/Paese/3phase_npc_inverter.

o último apresenta os sinais modulantes para as fases A, B e C. Observe nas Figuras 2-5 os resultados para cada caso descrito da seguinte forma:

- CASO 1: Operação sem carga na microrrede.
- CASO 2: Carga resistiva de 180 kW aplicada ao sistema.
- CASO 3: Carga indutiva de 230 kVA com fator de potência 0.8.
- CASO 4: Carga capacitiva de 230 kVA com fator de potência -0.8.

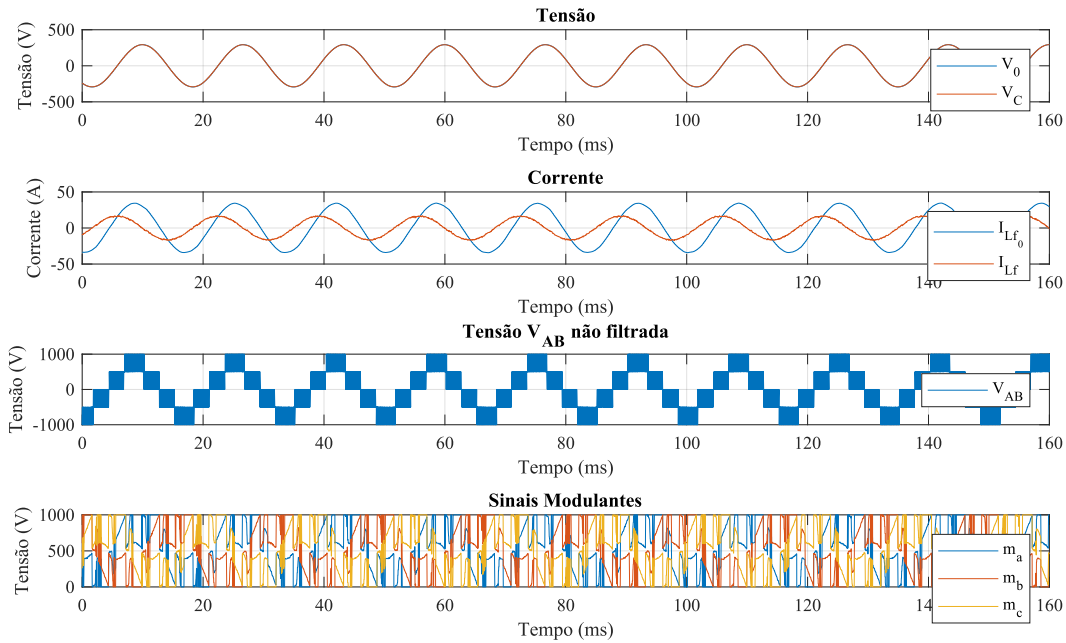


Figura 2: Caso 1: Regime Permanente sem Carga.

6.2 Impacto do Controle da Tensão no Ponto Central

No contexto do impacto do controle da tensão no ponto central V_{mid} , os quadrantes revelam o comportamento dinâmico dessa variável ao longo do tempo. Em um cenário específico onde a malha de controle de V_{mid} é temporariamente desativada por 300 ms e posteriormente reiniciada, observa-se a flutuação de V_{mid} , seguida pela sua convergência para o valor desejado quando a malha é novamente acionada em 600 ms. Na Figura 6 o resultado apresentado em cada quadrante diz respeito ao impacto do controle de V_{mid} para os quatro casos descritos anteriormente em sua respectiva ordem.

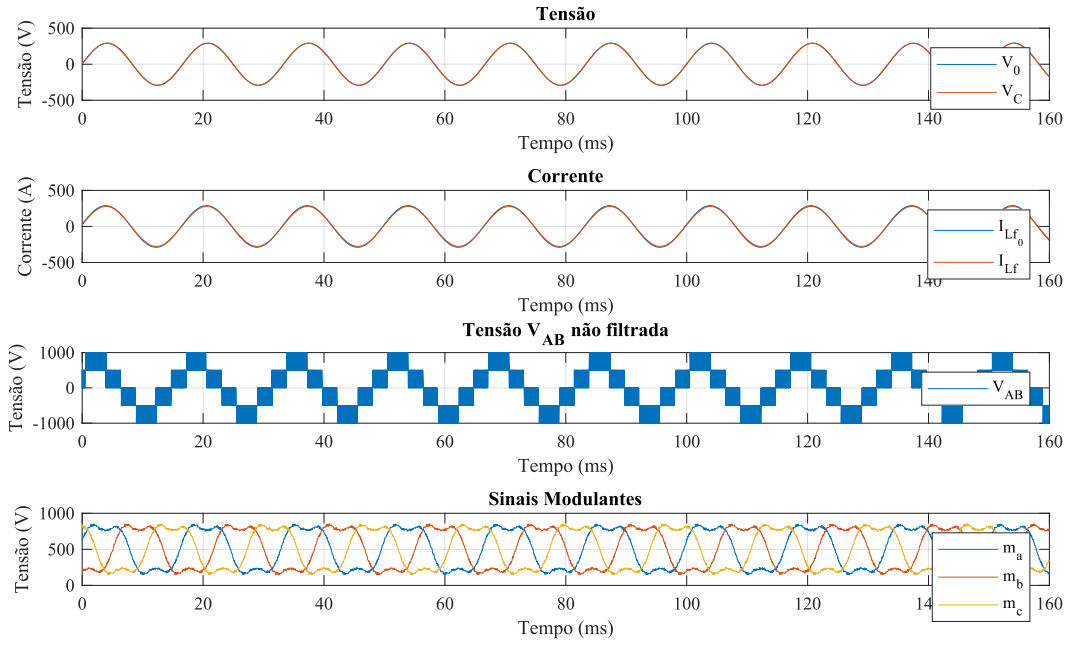


Figura 3: Caso 2: Regime Permanente para Carga Resistiva.

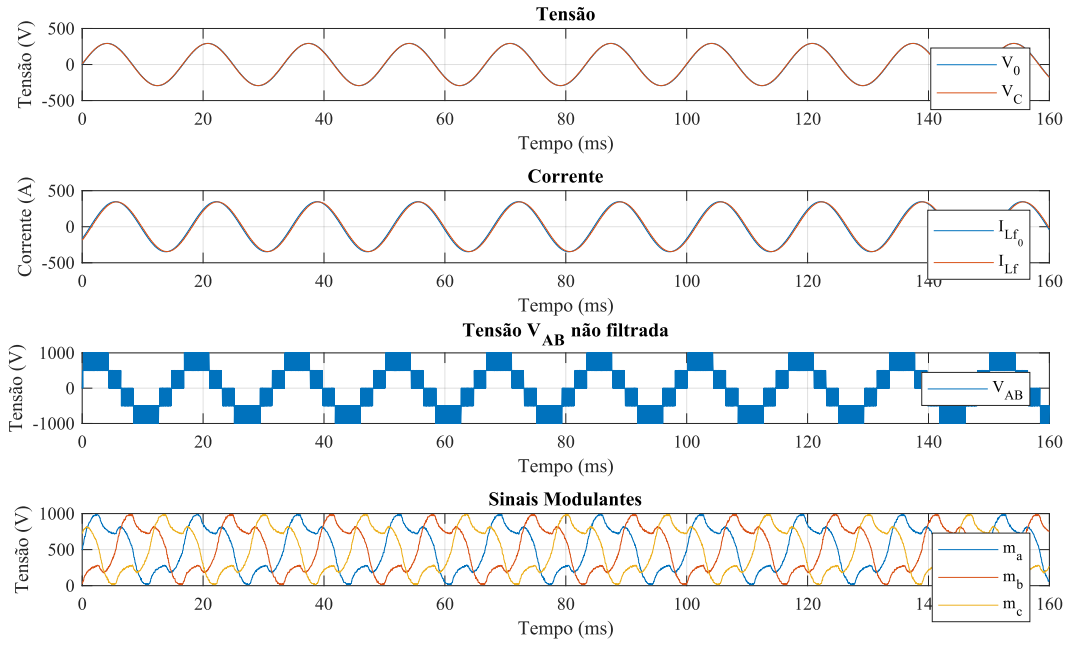


Figura 4: Caso 3: Regime Permanente para Carga Indutiva.

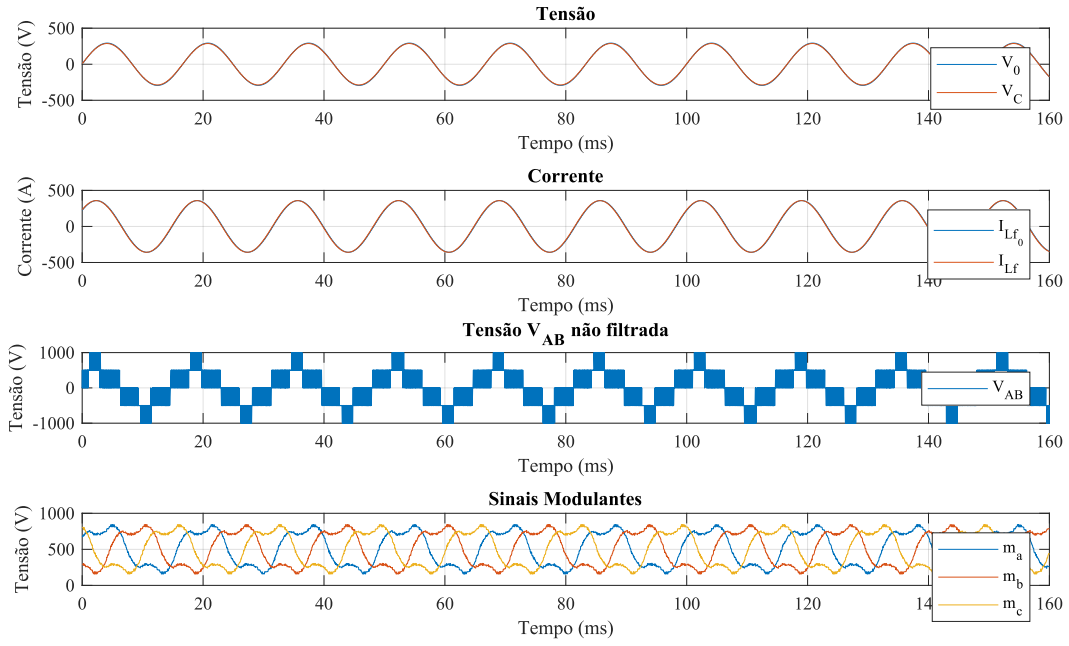


Figura 5: Caso 4: Regime Permanente para Carga Capacitiva.

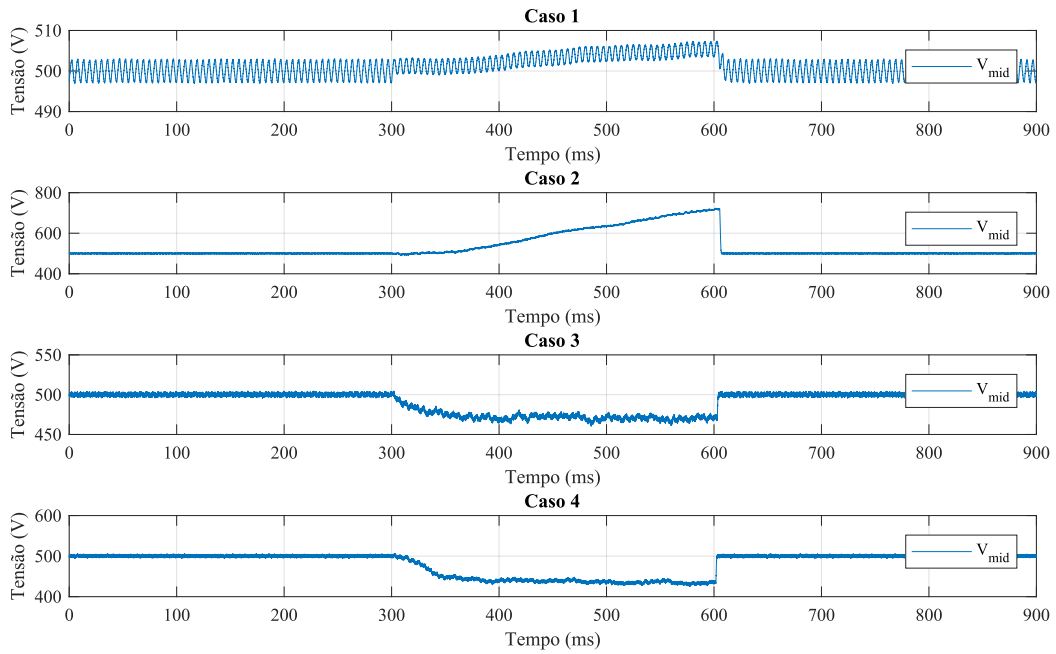


Figura 6: Impacto da Malha de Controle da Tensão V_{mid} .

Referências

- [1] A. P. Meurer, “CONTROLE HIERÁRQUICO PARA INVERSORES FORMADORES DE REDE EM MICRORREDES AC,” Tese de Doutorado, UFSM, 2023.
- [2] G. Balen and other, “Optimum geometric carrier-based modulation for npc and t-type inverters,” *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2019.
- [3] A. T. Pereira and H. Pinheiro, “Inner loop controllers for grid-forming converters,” *2022 14th Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC)*, 2022.
- [4] Typhoon HIL. (2023) C function. [Online]. Available: https://www.typhoon-hil.com/documentation/typhoon-hil-software-manual/References/c_function.html