

4. CONVERSORES CC/CA - INVERSORES

Serão estudados neste capítulo os conversores CC-CA que fornecem em suas saídas tensões com frequência fixa, para aplicação como fonte de tensão, com controle da corrente de saída.

O inversor deve fornecer uma tensão (ou corrente) alternada, com frequência, forma e amplitude definidas por algum sistema de controle. Em princípio, a saída deve ser independente de eventuais alterações na alimentação CC, na carga (situação de operação ilhada) ou na rede CA. Dado que a grande maioria das cargas é alimentada em corrente alternada, a aplicação destes conversores se dá tanto em sistemas isolados quanto nos interligados com a rede.

No primeiro caso, o inversor deve ser capaz de fornecer uma tensão de qualidade aceitável (cuja característica pode variar segundo o tipo de carga). Na operação interligada à rede, dado que a tensão é definida pelo sistema, o inversor é responsável pela injeção (ou absorção de corrente (de potência, portanto), na rede.

4.1 Inversores tipo fonte de tensão

A configuração básica de um inversor tipo fonte de tensão (VSI - *Voltage Source Inverter*) é mostrada na figura 4.1 para uma conexão trifásica. Uma saída monofásica pode ser obtida utilizando-se apenas dois ramos, ao invés de três. A figura omite os circuitos necessários ao comando dos transistores. Embora ilustrados como transistores bipolares, é possível a construção do circuito utilizando qualquer tipo de interruptor que seja comandado para ligar e para desligar e que apresente tempos de comutação relativamente curtos.

Uma vez que se tem uma tensão no lado CC, quando um interruptor da semiponte superior e outro da semiponte inferior (nunca os dois de um mesmo ramo) estiverem em condução, esta tensão CC aparecerá em um par de condutores da saída alternada.

Como não se sabe, a priori o que estará conectado no lado CA, sempre a conexão se fará por meio de indutores, os quais permitem limitar a corrente (na verdade sua derivada) nas situações em que a tensão V_{ca} for diferente do valor V_{cc} , ou seja, o que acontece praticamente todo o tempo.

Os diodos presentes no circuito garantem uma bidirecionalidade no sentido da corrente, necessária à correta operação do conversor.

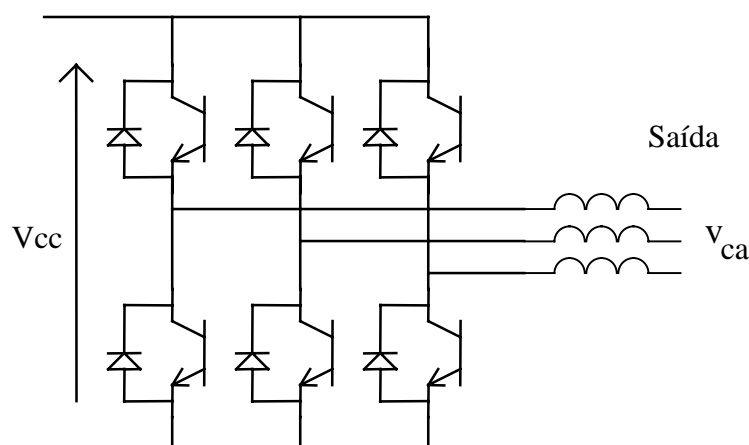


Figura 4.1 Inversor trifásico tipo fonte de tensão.

4.2 Inversor tipo fonte de corrente

Desde que se disponha de uma fonte de corrente CC (CSI – *Current Source Inverter*) pode-se aplicar técnicas de modulação de largura de pulso (ou outra qualquer), à semelhança do que se faz com as fontes de tensão. Uma fonte de corrente CC é tipicamente obtida com retificadores controlados e com o uso de indutores com valor elevado de indutância atuando como filtro. O retificador é controlado de modo a manter constante o valor médio da corrente.

Os interruptores a serem usados no circuito devem permitir passagem de corrente num único sentido e serem capazes de bloquear tensões com ambas polaridades. Deve-se garantir que haja sempre uma chave em condução em cada semiponte. A figura 4.2 mostra uma topologia deste tipo.

Caso a impedância da carga seja indutiva (que é a situação mais usual), é necessária a colocação de capacitores na saída do inversor de modo a acomodar as diferenças instantâneas nos valores das correntes de entrada e da carga. Tais capacitâncias podem provocar ressonâncias com as componentes indutivas do circuito, devendo-se controlar a tensão sobre os capacitores.

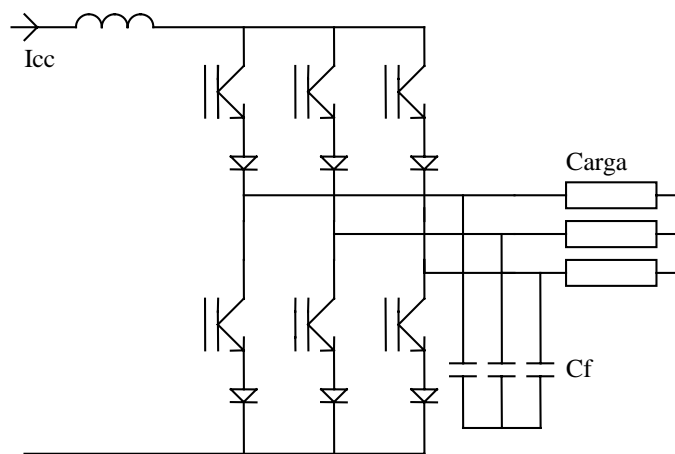


Figura 4.2 Inversor fonte de corrente MLP utilizando IGBT.

4.3 Inversor VSI com saída quadrada

Considere o circuito de um inversor monofásico como mostrado na figura 4.3. As leis de modulação são numerosas, a mais simples talvez seja a que produz uma onda retangular, na própria frequência de saída que se deseja. Em tal caso, uma tensão positiva é aplicada à carga quando T1 e T4 conduzem (estando T2 e T3 desligados). A tensão negativa é obtida complementarmente. O papel dos diodos é garantir um caminho para a corrente em caso de a carga apresentar característica indutiva. Durante a condução dos diodos (D1 e D4 ou D2 e D3) há retorno de corrente para a fonte. Note que a condução dos diodos não afeta a forma da tensão desejada. Este tipo de modulação não permite o controle da amplitude nem do valor eficaz da tensão de saída.

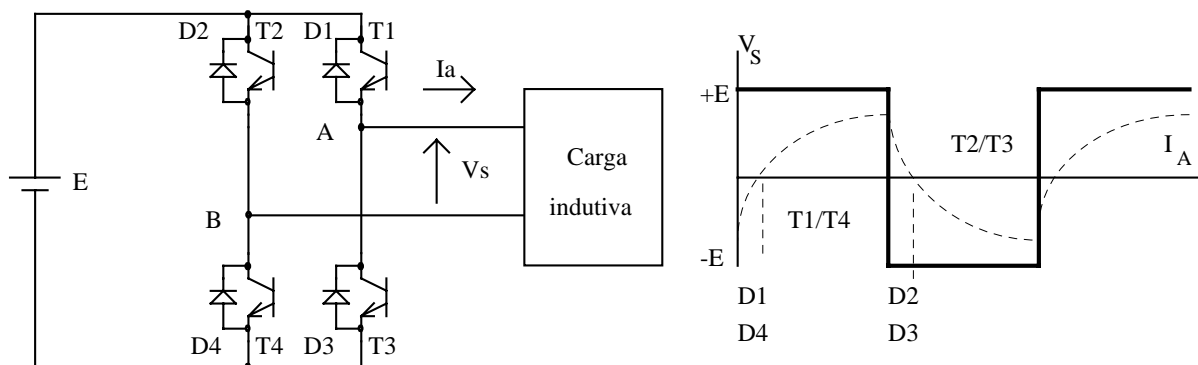


Figura 4.3. Inversor monofásico e forma de onda quadrada de saída (carga indutiva).

4.4 Inversor VSI com saída quase-quadrada.

Uma alternativa que permite ajustar o valor eficaz da tensão de saída e eliminar algumas harmônicas é a chamada saída de onda quase-quadrada, na qual se mantém um nível de tensão nulo sobre a carga durante parte do período, como mostrado na figura 4.4 com o respectivo espectro.

Para obter este tipo de onda, uma possibilidade é a seguinte: quando se deseja tensão positiva na carga mantém-se T1 e T4 conduzindo (T2 e T3 desligados). A tensão negativa é obtida complementarmente. Os intervalos de tensão nula são obtidos mantendo T1 conduzindo e desligando T4. Com corrente positiva, D2 entrará em condução. Quando T1 desligar D3 entra em condução, aguardando o momento em que T2 e T3 conduzem, o que ocorre quando a corrente se inverte. O intervalo de tensão nula seguinte é obtido com o desligamento de T3 e a continuidade de condução de T2. Durante a condução dos diodos (D1 e D4 ou D2 e D3) há retorno de corrente para a fonte.

Nota-se que estão presentes os múltiplos ímpares da frequência de chaveamento, o que significa que a filtragem de tal sinal para a obtenção apenas da fundamental exige um filtro com frequência de corte muito próxima da própria frequência desejada. Este espectro varia de acordo com a largura do pulso. Para este caso particular não estão presentes os múltiplos da terceira harmônica.

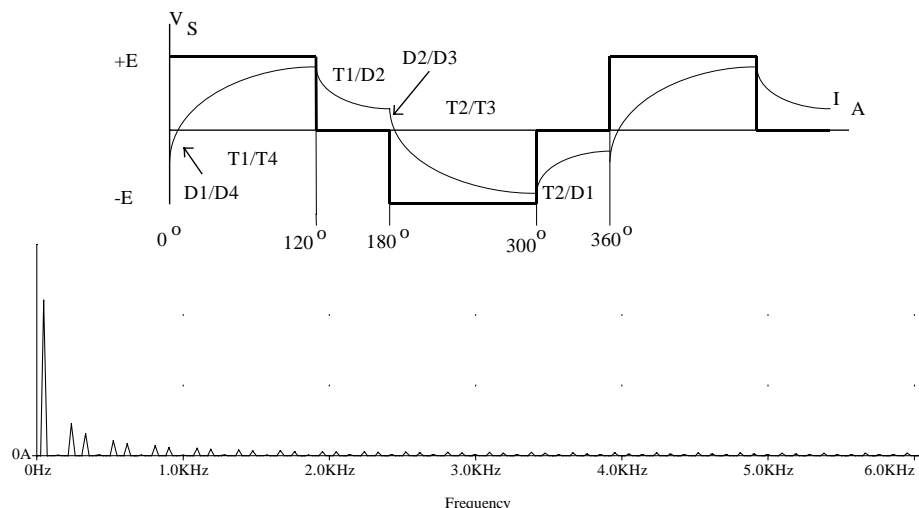


Figura 4.4 Forma de onda e espectro da onda quase-quadrada.

4.5 Modulação por Largura de Pulso - MLP

Uma outra maneira de obter um sinal alternado de baixa frequência é através de uma modulação em alta frequência.

É possível obter este tipo de modulação ao comparar uma tensão de referência (que seja imagem da tensão de saída buscada), com um sinal triangular simétrico cuja frequência determine a frequência de chaveamento. A frequência da onda triangular (chamada portadora) deve ser, no mínimo 20 vezes superior à máxima frequência da onda de referência, para que se obtenha uma reprodução aceitável da forma de onda sobre a carga, depois de efetuada a filtragem. A largura do pulso de saída do modulador varia de acordo com a amplitude relativa da referência em comparação com a portadora (triangular). Tem-se, assim, uma Modulação por Largura de Pulso.

A tensão de saída, que é aplicada à carga, é formada por uma sucessão de ondas retangulares de amplitude igual à tensão de alimentação CC e duração variável.

A figura 4.5 mostra a modulação de uma onda senoidal, produzindo na saída uma tensão com dois níveis, na frequência da onda triangular.

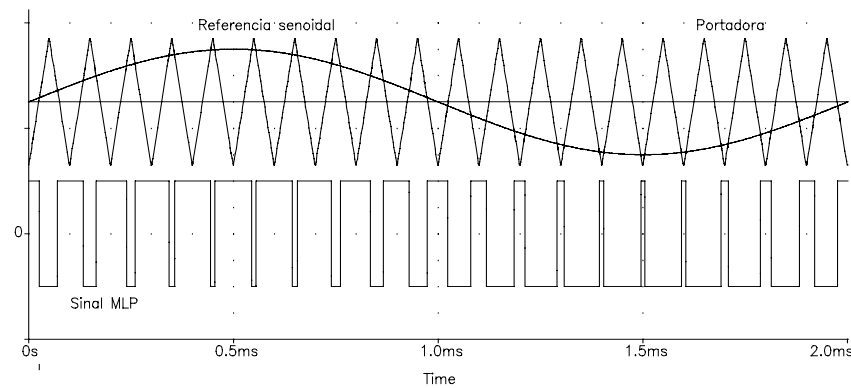


Figura 4.5. Sinal MLP de dois níveis.

Pelo comando adequado dos interruptores, é possível ainda obter uma modulação a três níveis (positivo, zero e negativo). No caso de um inversor trifásico, mesmo que a tensão em um ramo seja de dois níveis, a tensão de linha será de três níveis, como mostra a figura 4.6. A modulação apresenta um menor conteúdo harmônico.

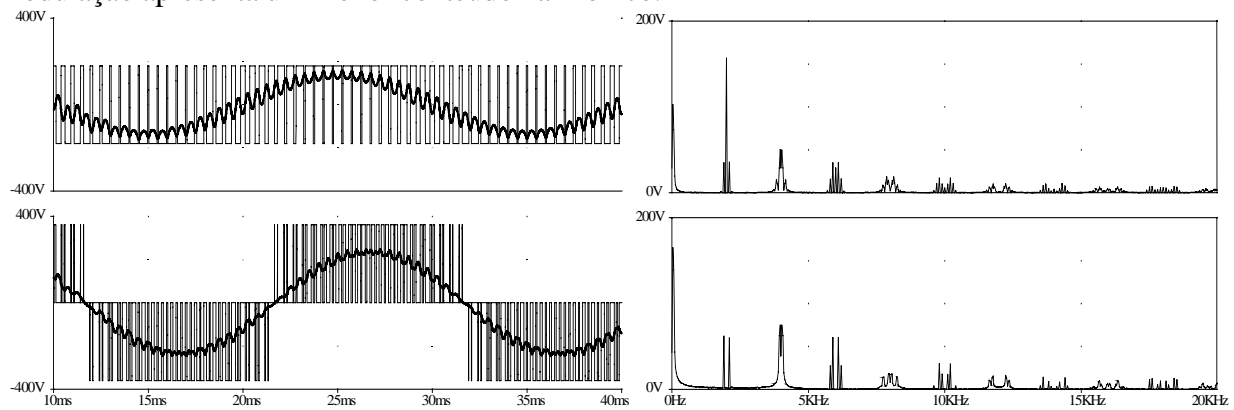


Figura 4.6 Formas de onda da tensão de fase e de linha em inversor trifásico. Indicam-se ainda os respectivos sinais MLP filtrados. Espectro dos sinais MLP de 2 e 3 níveis.

Quando se trata de um inversor trifásico, dois arranjos podem ser feitos: utilizando três inversores monofásicos (o que exige 12 transistores, e é chamado de ponte completa) ou um arranjo chamado de semiponte, com 6 transistores, como o mostrado na figura 4.7, que é a estrutura normalmente utilizada. A figura 4.8 mostra um resultado experimental no qual se tem o sinal modulado em alta frequência, produzido pelo inversor e a saída obtida após uma filtragem que minimiza as componentes de alta frequência e permite a passagem apenas da componente de baixa frequência, no caso uma senóide.

A obtenção de uma onda senoidal que recupere a onda de referência é facilitada pela forma do espectro. Note-se que, após a componente espectral relativa à referência, aparecem componentes nas vizinhanças da frequência de chaveamento. Ou seja, um filtro passa baixas com frequência de corte acima de 50/60 Hz é perfeitamente capaz de produzir uma atenuação bastante efetiva em componentes na faixa de kHz.

Na estrutura em semiponte, caso seja necessário um neutro, deve-se fazer uso de transformadores. Em presença de carga desequilibrada, como as tensões de linha são obtidas de uma diferença de tensões de fase, não é simples fazer-se a compensação da tensão.

Outras estratégias de modulação são possíveis, como a por vetores espaciais¹ (*space vector modulation* – SVM), mas seu estudo foge do escopo deste curso.

¹ Apostila da disciplina Eletrônica de Potência, em <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/elpot.html>

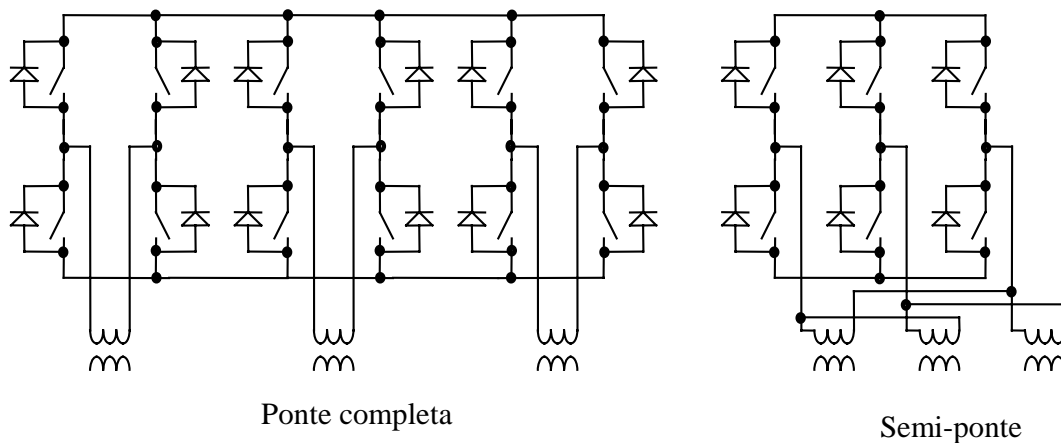


Figura 4.7 Topologias de inversor em ponte completa e em semiponte.

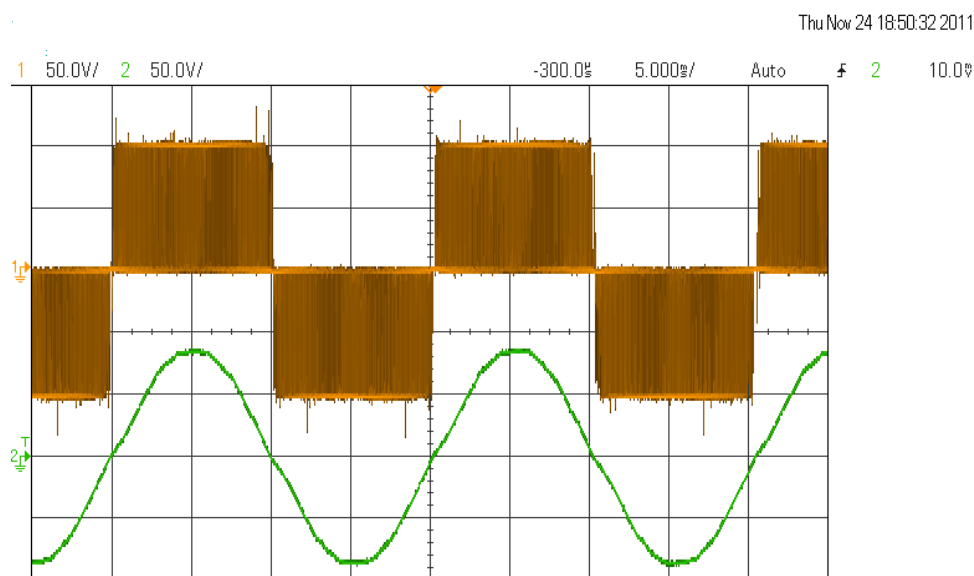


Figura 4.8 Forma de onda experimental de inversor MLP e respectiva tensão filtrada

4.6 Inversor multinível

Os conversores multiníveis apresentam vantagens sobre conversores MLP, especialmente para aplicações de média e alta potência, tais como: possibilidade de conexão direta com a rede sem que seja necessário o uso de transformadores; redução dos níveis de Interferência Eletromagnética (EMI) devido à menor taxa de variação da tensão de saída; possibilidade de obtenção de níveis mais altos de potência sem a necessidade de associações em série e/ou paralelo de chaves, etc.

Por outro lado, há algumas desvantagens que devem ser consideradas para a escolha de uma topologia multinível como conversor CC/CA. As estratégias de modulação são mais complexas do que para conversores convencionais. Além disso, Microcontroladores (μC) e Processadores Digitais de Sinal (DSP) disponíveis no mercado não possuem *hardware* adequado para implementação das estratégias de modulação, dificultando suas implementações. Esta desvantagem pode ser superada por meio de algoritmos adequados e/ou com a inclusão de circuitos analógicos e digitais externos, os quais devem ser desenvolvidos especialmente para propósitos de modulação.

Na figura 4.9 tem-se um diagrama esquemático do conversor multinível do tipo cascata simétrica (as tensões CC são iguais). É possível também adicionar um comando MLP ao inversor

multinível de modo a reduzir ainda mais a distorção da tensão produzida e minimizar a exigência de filtragem. Uma forma de onda desse tipo é mostrada na figura 4.10.

Nota-se que a distorção harmônica é reduzida. Os filtros necessários à obtenção de uma onda senoidal devem ter uma frequência que depende do número de níveis presentes na saída, já que as componentes espectrais aparecem nos múltiplos de $2n+1$, onde n é o número de níveis da saída. uma vez que as componentes harmônicas apresentam-se em múltiplos da frequência da rede. No entanto, a atenuação não precisa ser muito grande, uma vez que as amplitudes das harmônicas são relativamente pequenas.

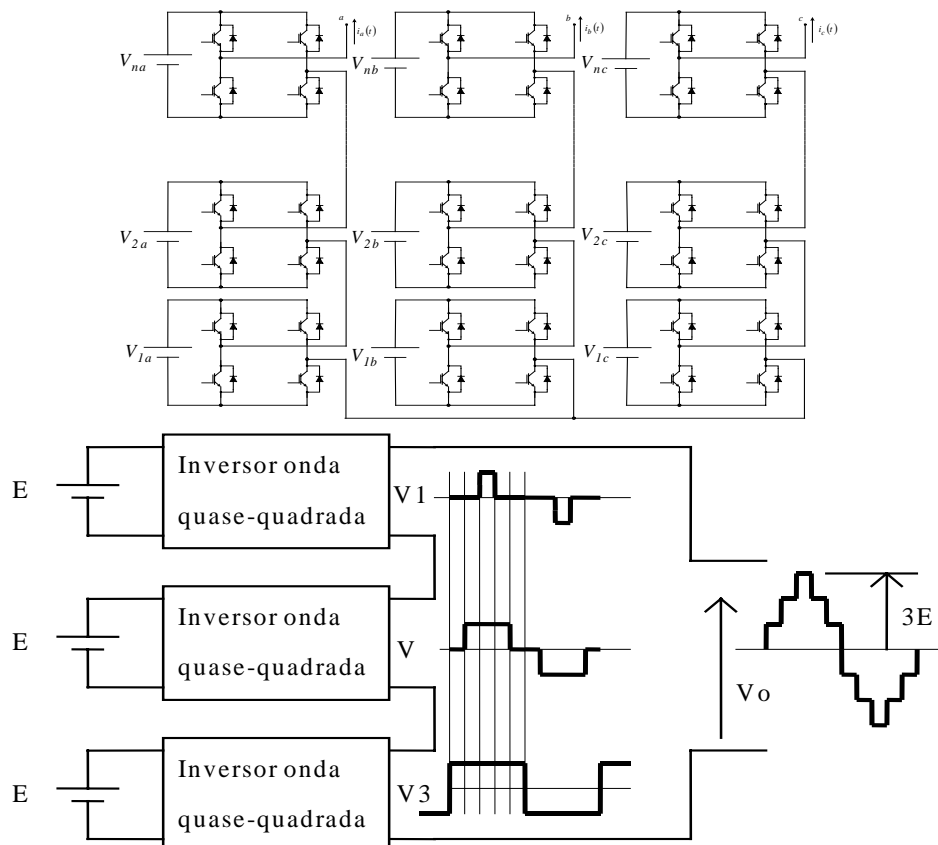


Figura 4.9 Diagrama esquemático de conversor multinível do tipo cascata simétrica

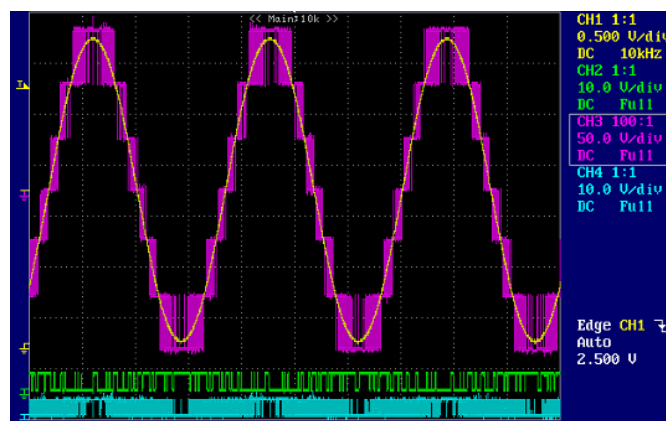


Figura 4.10 Forma de onda experimental de inversor multinível com ajuste MLP²

² de Alvarenga, Marcos B.; Pomilio, J. A. "Analysis of pulse suppression in PWM modulation for symmetric cascaded multilevel inverters", IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society_2011 , Page(s): 4654 – 4659

Em 4.11 tem-se uma forma de onda de conversor em cascata assimétrica (as tensões CC são diferentes). Nesse caso, dadas as combinações possíveis entre as diferentes tensão, é possível conseguir uma quantidade maior de níveis intermediários, minimizando a distorção da tensão sintetizada, mesmo sem uso de MLP.

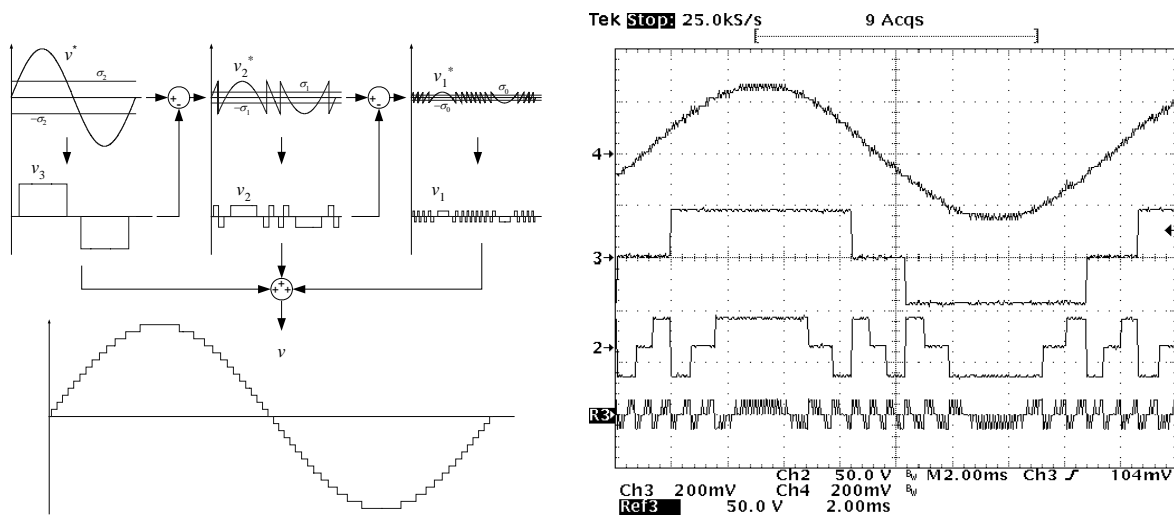


Figura 4.11 Forma de onda de sinal multinível tipo cascata assimétrica, com modulação em escada (esq.) e experimental (dir.).³

A figura 4.12 mostra o circuito e as formas de onda de um inversor trifásico de cinco níveis do tipo com grampeamento por diodos. A vantagem em relação à estrutura em cascata é que se utiliza apenas uma fonte CC, no entanto, quando se deseja um número maior de níveis, conversores deste tipo necessitam de uma quantidade maior de componentes em relação à topologia em cascata, o que inviabiliza seu uso. A figura mostra a tensão de fase com três níveis. A tensão de linha apresenta-se com cinco níveis.

As formas de onda mostradas fazem uso de modulação do tipo PWM. Outros métodos de modulação também são possíveis, como a SVM, mas fogem dos objetivos desse curso.

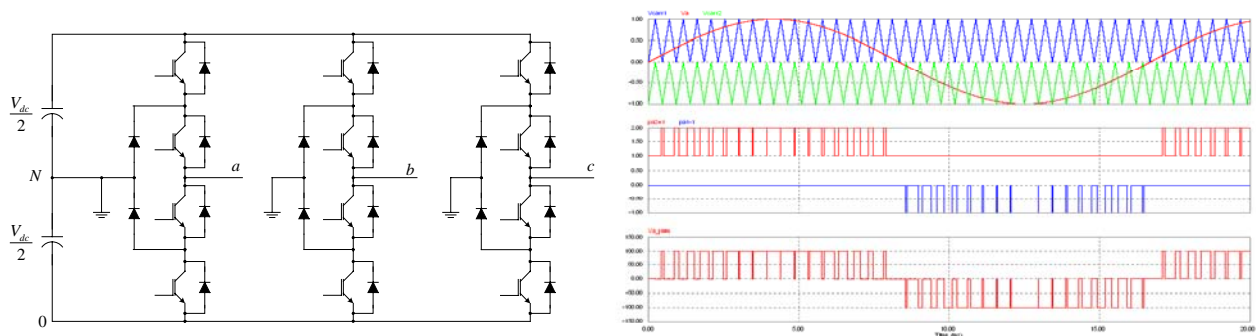


Figura 4.12 Inversor trifásico de cinco níveis com grampeamento por diodos e sinais de controle e de saída.⁴

³ L. de A. Silva, S. P. Pimentel e J. A. Pomílio: "Sistema de Filtragem Ativa com Inversor Multinível Assimétrico em Cascata de Dezenove Níveis e Controle de Tensão no Barramento CC", Eletrônica de Potência, Vol.11, no.1, Março de 2006, pp. 17-24

⁴ Leonardo de Araújo Silva: "Síntese de Indutância Negativa para Aplicação Série em Redes de Energia Elétrica", 29 de março de 2007.

4.7 Modulação por limites de corrente - MLC (Histerese)

Neste caso, são estabelecidos os limites máximos e/ou mínimos da corrente, fazendo-se o chaveamento em função de serem atingidos tais valores extremos. O valor instantâneo da corrente, em regime, é mantido sempre dentro dos limites estabelecidos e o conversor comporta-se como uma fonte de corrente.

Tanto a frequência como o ciclo de trabalho são variáveis, dependendo dos parâmetros do circuito e dos limites impostos. A figura 4.13 mostra as formas de onda para este tipo de controlador.

MLC só é possível em malha fechada, pois é necessário medir instantaneamente a variável de saída. Por esta razão, a relação entre o sinal de controle e a tensão média de saída é direta. Este tipo de modulação é usado, principalmente, em conversores com controle de corrente e que tenham um elemento indutivo na saída.

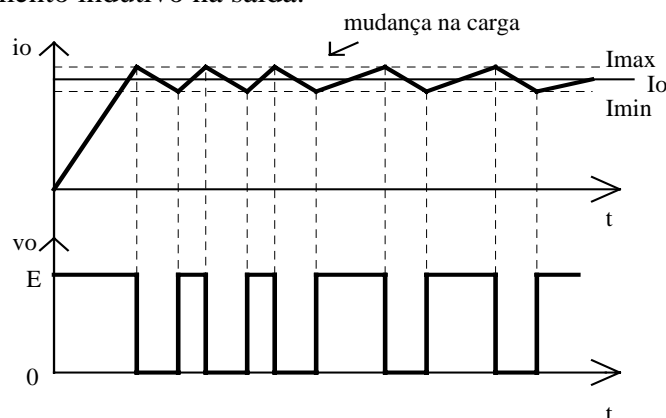


Figura 4.13. Formas de onda de corrente e da tensão de saída com controlador MLC.

Na figura 4.14 vê-se a forma de onda da tensão de saída, aplicada à carga, a tensão de entrada do comparador com histerese (que estabelece os limites de variação da corrente) e a própria corrente sobre a carga. Na figura 4.15 tem-se os espectros do sinal MLC e o da corrente. Note-se o espalhamento devido ao fato de a frequência não ser constante e a inerente filtragem proporcionada pelo tipo de controle.

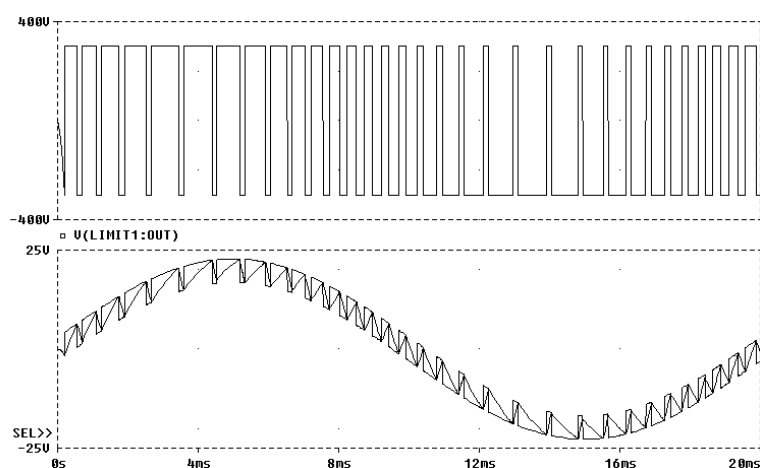


Figura 4.14 Sinal MLC (superior), entrada do comparador com histerese e corrente resultante (inferior).

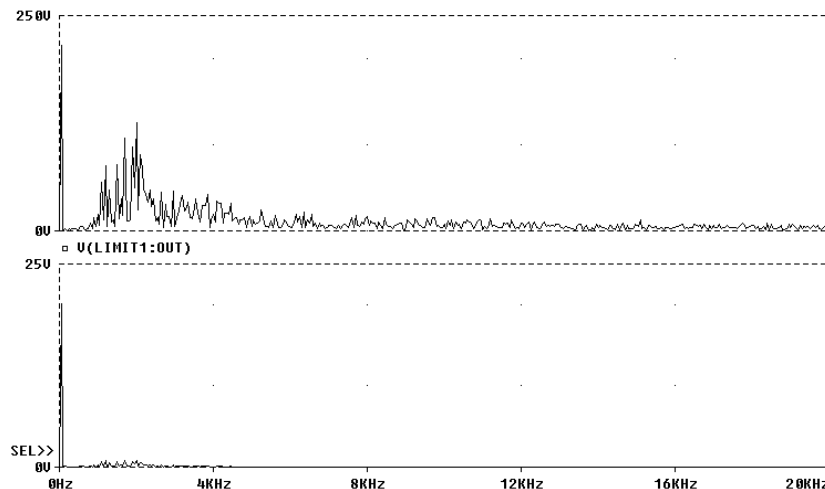


Figura 4.15 Espectro de sinal MLC (superior) e da corrente de saída (inferior).

A figura 4.16 mostra o comportamento de um sistema com MLC seguindo uma referência triangular. Note que, no início, o estado do conversor permanece inalterado até que seja atingida a referência dada (no caso, o valor máximo negativo). A partir deste ponto, a referência é seguida sem erro de valor médio. A ondulação será tanto menor quanto a resolução do comparador com histerese o permita. Qualquer referência utilizada será seguida da mesma forma, ou seja, é possível sintetizar qualquer tipo de corrente, respeitando-se as limitações de frequência de comutação do conversor e a precisão dos sensores de corrente.

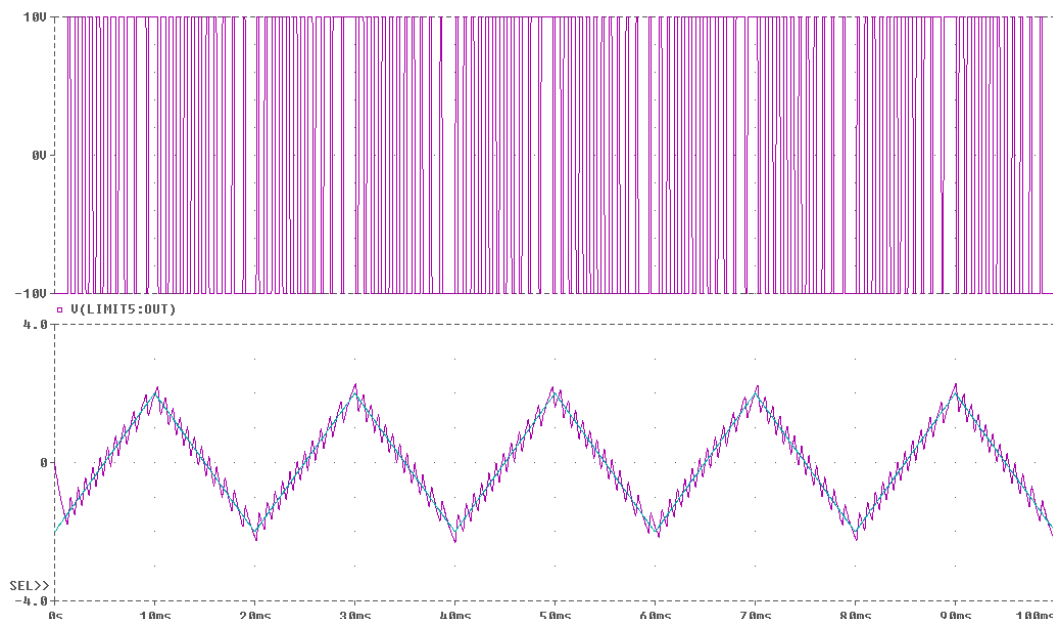


Figura 4.16 Sinais de MLC com referência triangular.

4.8 Estruturas de controle

A figura 4.17 permite comparar a resposta da MLC com a MLP a partir de uma fonte de tensão, em malha aberta. Note que a corrente sobre a carga RL não segue a referência, pois, neste caso, o inversor é do tipo fonte de tensão, enquanto a variável observada é a corrente sobre a carga. Para que o erro seja corrigido é necessário operar em malha fechada, ou seja, realimentando a corrente e definindo a referência para o sinal MLP a partir do erro da corrente.

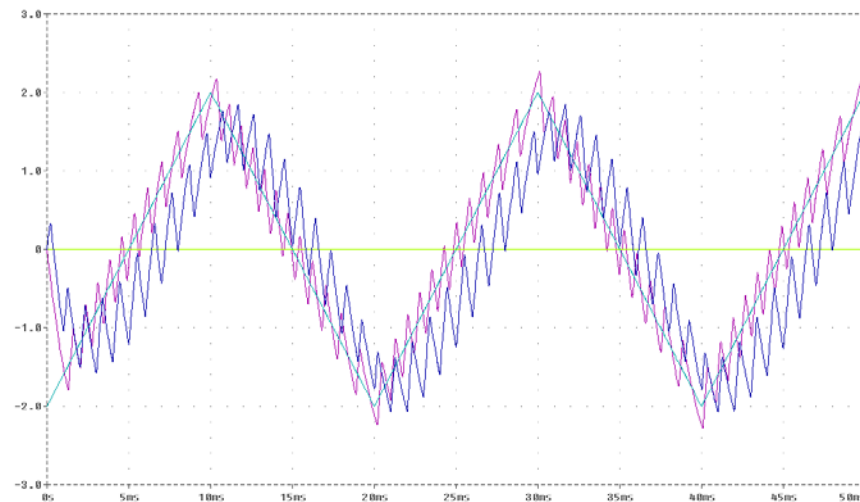


Figura 4.17 Comparação de resposta de MLC e de MLP (inversor fonte de tensão em malha aberta) com referência triangular.

A figura 4.18 ilustra uma situação de operação em malha aberta. Nesse caso, um conversor VSI é capaz de sintetizar em sua saída uma tensão que segue a referência dada, de forma linear. O filtro de saída atuará sobre esse sinal modulado e seu papel é minimizar as componentes de alta frequência. Estando o filtro bem sintonizado, a tensão CA reproduzirá adequadamente a referência.

Quando é necessário controlar a corrente de saída de um conversor VSI tem-se que operar em malha fechada, como mostra a figura 4.19. Mede-se a corrente de saída, a qual é comparada com a referência. O erro é processado por um compensador, cuja saída é a entrada para o bloco MLP.

Principalmente em casos de cargas não lineares, pode ser necessário operar em malha fechada mesmo para a síntese de tensão, de modo a garantir a forma adequada da tensão de saída. Nesse caso, ter-se-ia um sensor de tensão, cuja saída seria comparada com a referência.

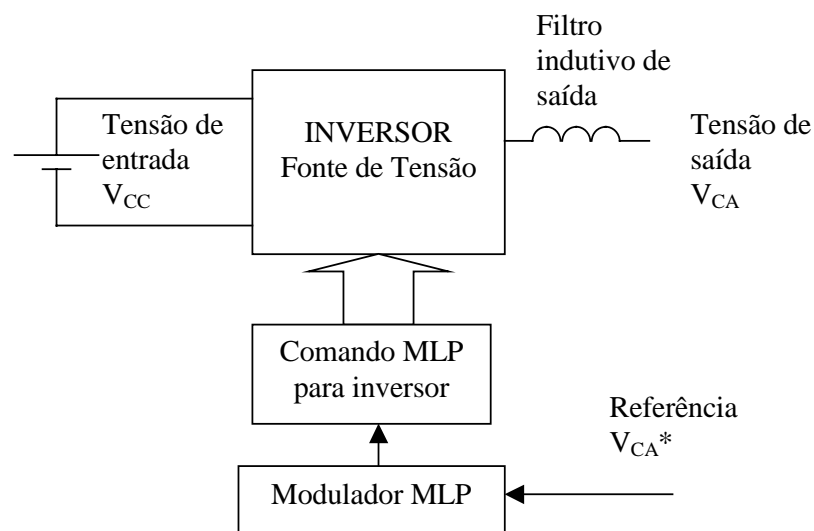


Figura 4.18 Operação de conversor VSI em malha aberta: síntese adequada da tensão de saída

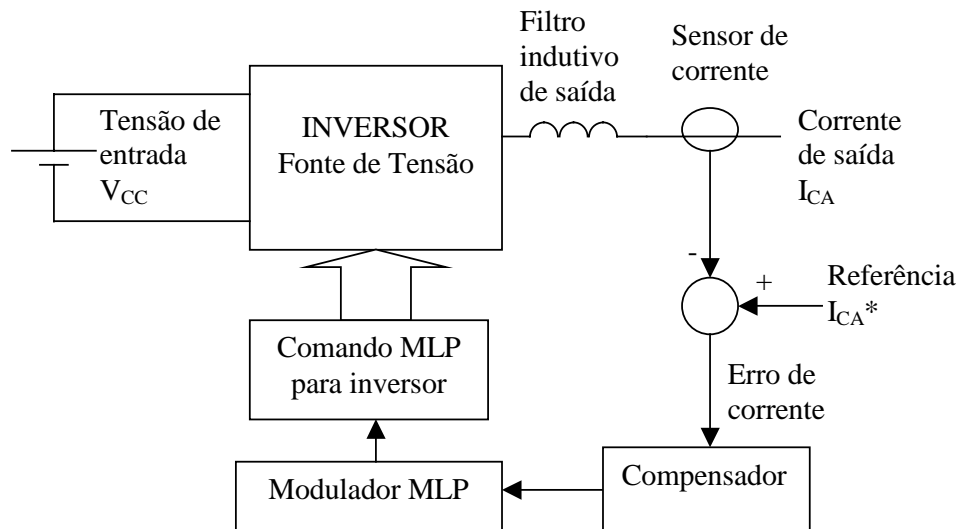


Figura 4.19 Operação de conversor VSI em malha fechada para síntese de corrente de saída

Quando se tem um conversor CSI, é possível obter a desejada corrente CA na saída mesmo operando em malha aberta. A corrente reproduzirá (em seu conteúdo espectral de baixa frequência) o sinal de referência, após a devida filtragem, como ilustra a figura 4.20.

Para a síntese de uma tensão CA a partir de uma tensão CA a partir de uma entrada em corrente CC, é preciso operar em malha fechada, conforme mostra a figura 4.21.

O uso de conversores CSI é menos frequente do que o de VSI por conta das maiores perdas associadas à constante circulação de corrente que tem que ocorrer nos CSI, mesmo que a variável de saída (corrente ou tensão) seja nula. Nos VSI, para uma saída nula, basta manter os interruptores no estado aberto.

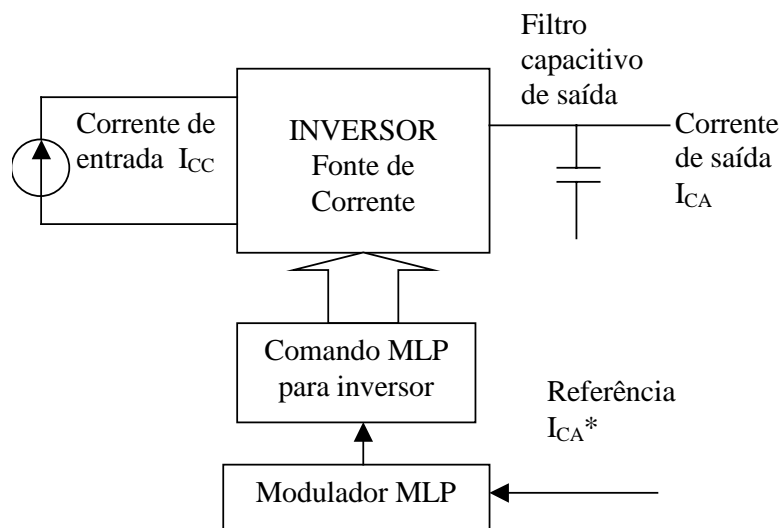


Figura 4.20 Operação de conversor CSI em malha aberta: síntese adequada da corrente de saída

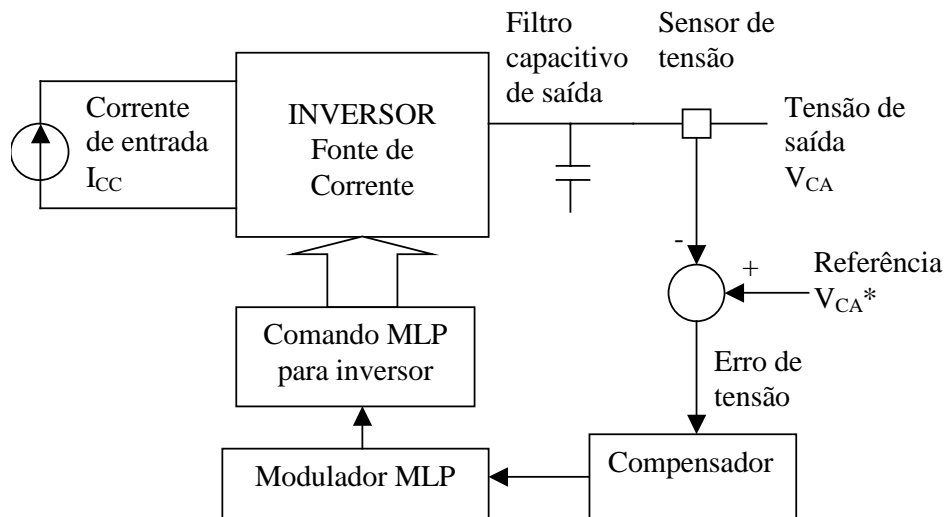


Figura 4.21 Operação de conversor CSI em malha fechada para síntese de tensão de saída

4.8.1 Sincronismo com a rede – PLL

A figura 4.22 mostra a estrutura completa de controle de um inversor trifásico, conectado à rede. No caso, é feita uma transformação do sistema trifásico para o sistema bifásico girante, dq, sendo feito o controle da potência ativa e reativa injetadas na rede. Não é objetivo deste curso discutir esses aspectos de modelagem específicos.⁵

O bloco PLL (*Phase Locked Loop*) é o responsável pelo sincronismo entre as tensões da rede, medidas no barramento V_t , e aquelas produzidas pelo inversor. A saída do bloco PLL permite alterar a frequência das tensões no barramento V_i , minimizando os desvios.

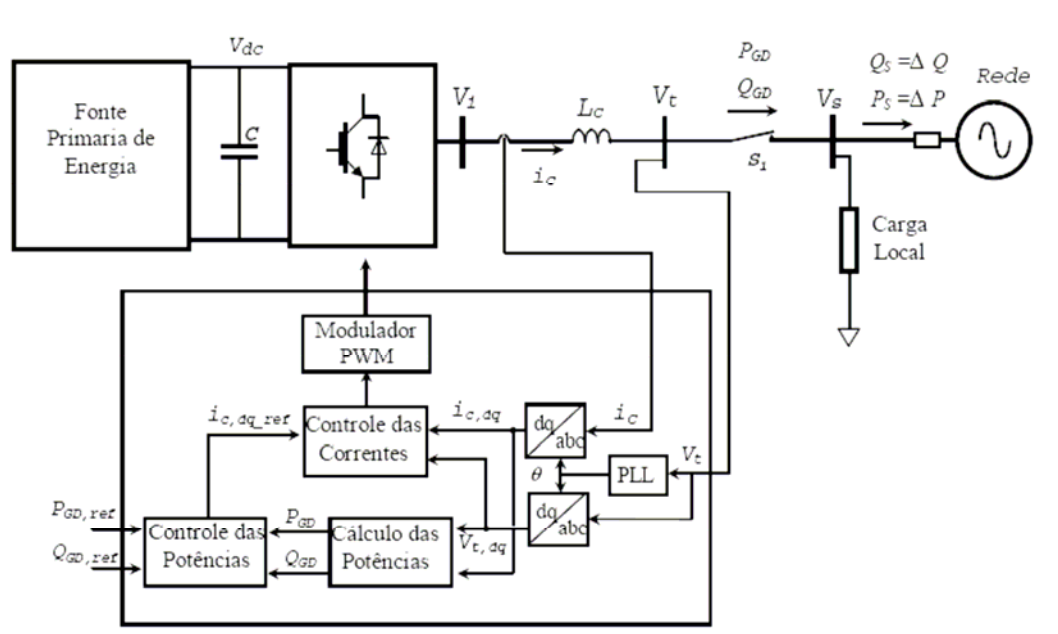


Figura 4.22 Possível estrutura de controle e comando de conversor VSI incluindo sistema de sincronismo com a rede.

⁵ Rodolfo Manuel Moreno Martinez: “Estudo de Técnicas de Controle de Fluxo de Potência e de Gerenciamento de Ilhamento em Sistemas de Geração Distribuída com Interfaces Eletrônicas de Potência para Conexão com a Rede Elétrica”, Tese de Doutorado, FEEC-UNICAMP, 22 de fevereiro de 2010.

A idéia básica é a de detectar uma diferença instantânea entre o sinal de referência interno e o sinal externo, que deve ser seguido, como mostra a figura 4.23. O filtro produz uma tensão proporcional ao erro de fase/frequência entre os sinais e atua no VCO (*Voltage Controlled Oscillator*), que é um oscilador controlado por tensão que altera a frequência interna de modo a igual-a-la à do sinal externo. Há inúmeras estruturas de PLLs, mono e trifásicas, mas que não serão discutidas nesse curso.^{6 7}

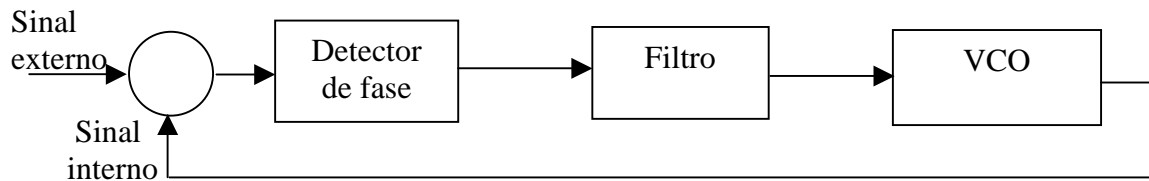


Figura 4.23 estrutura básico de um PLL.

4.9 Outras aplicações de inversores: Compensação de reativos e Filtragem ativa

A função dos inversores é fazer com que se produza uma corrente ou tensão alternada que siga uma dada referência, a qual está relacionada com as componentes da corrente (ou tensão) de referência. Para a injeção de potência na rede, normalmente o que se quer é uma corrente senoidal. Na operação isolada, o objetivo é produzir uma tensão senoidal. No entanto, há outras aplicações que fazem uso das mesmas topologias, mas que têm outros objetivos.

4.9.1 Compensação de reativos

A topologia do inversor é usada para realizar o chamado STATCOM, cujo circuito é mostrado na figura 4.24. Nesse caso, os interruptores controlados são GTOs (*Gate Turn-Off Thyristor*).

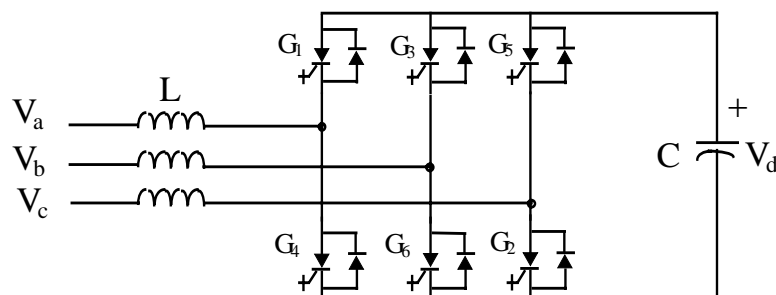


Figura 4.24 Compensador STATCOM com GTOs

No caso de compensação reativa pura, as correntes ou tensões sintetizadas devem estar defasadas de 90 graus das respectivas tensões ou correntes no PAC, como mostrado na figura 4.25, na qual o conversor está sintetizando um comportamento indutivo. Na corrente nota-se a presença de componentes de alta frequência devidas ao chaveamento. Normalmente o inversor possui uma fonte CC para conversão de potência CA, no entanto, se o conversor não tiver que fornecer potência ativa no PAC, é possível operá-lo apenas com um elemento de acúmulo de energia no barramento CC.

⁶ Rubens M. Santos Filho, Paulo F. Seixas, Porfírio C. Cortizo, Leonardo A. B. Torres, and André F. Souza, Comparison of Three Single-Phase PLL Algorithms for UPS Application, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 55, NO. 8, AUGUST 2008

⁷ S. A. Oliveira da Silva, R. Novochadlo, R. A. Modesto, Single-Phase PLL Structure Using Modified p-q Theory for Utility Connected System. IEEE PESC 2008.

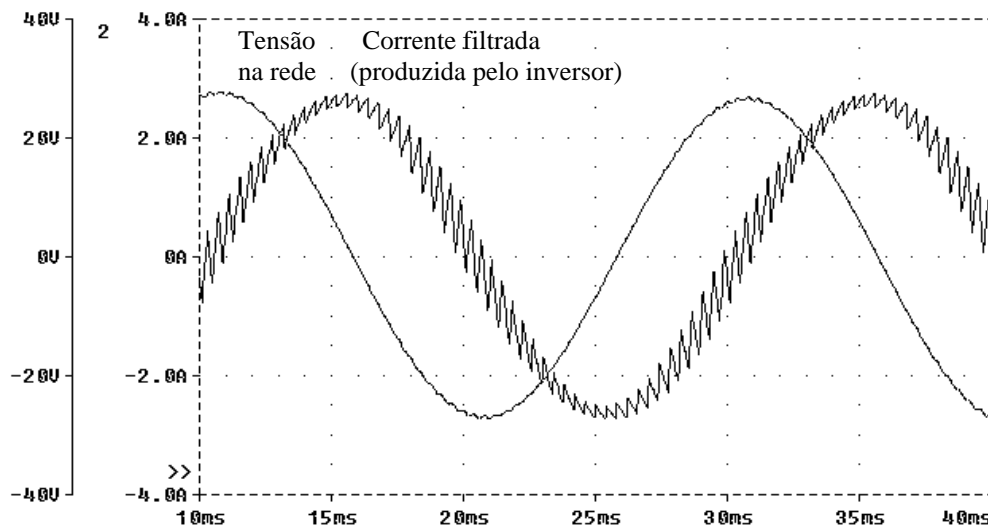


Figura 4.25 Formas de onda de Statcom.

Embora o conversor esteja apresentando um comportamento indutivo, do ponto de vista da relação entre a tensão e a corrente no PAC, isso não tem nenhuma relação com os indutores do circuito, que estão presentes apenas com a função de filtrar a corrente. Tal funcionamento se deve, exclusivamente, à estratégia de controle, a qual define uma referência de corrente que está atrasada de 90° da tensão. As limitações que se aplicam são a máxima corrente que se pode passar pelos interruptores e a tensão no barramento CC, que tem que ser maior do que o valor de pico da tensão no PAC, de modo a que se tenha controle pleno sobre a corrente a ser produzida na saída. Mesmo o capacitor do lado CC não tem relação direta com a capacidade de compensação, pois apenas faz uma regulação da tensão e não tem função de armazenador de energia.

4.9.2 Filtro ativo de potência

A realização de um filtro ativo de potência (FAP) utiliza a capacidade de um conversor CC-CA produzir uma tensão ou corrente alternada com qualquer forma de onda. Obviamente tal capacidade de síntese é limitada em termos de frequência a um valor de aproximadamente $1/10$ da frequência de comutação, admitindo-se ainda a existência de um filtro de saída que minimize a penetração de componentes de alta frequência na rede elétrica.

A figura 4.26 ilustra um conversor multinível em cascata assimétrica operando como FAP monofásico para compensar a distorção da corrente da carga, de modo que a fonte veja uma carga resistiva equivalente em termos da potência ativa consumida.

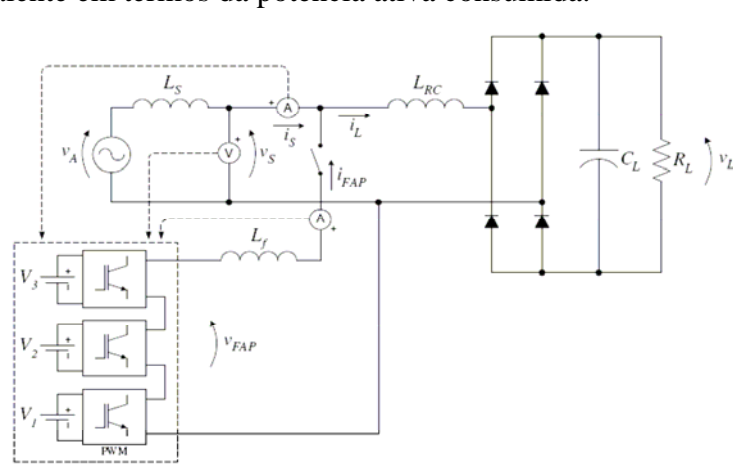


Figura 4.26 FAP monofásico com inversor multinível.

As figuras 4.27 e 4.28 mostram formas de onda experimentais desta aplicação. Observe que a tensão de saída do inversor é já muito próxima de uma senóide, diferindo, essencialmente, nos momentos em que há alteração da corrente da carga, quando se faz necessária injeção de corrente com maior taxa de variação.

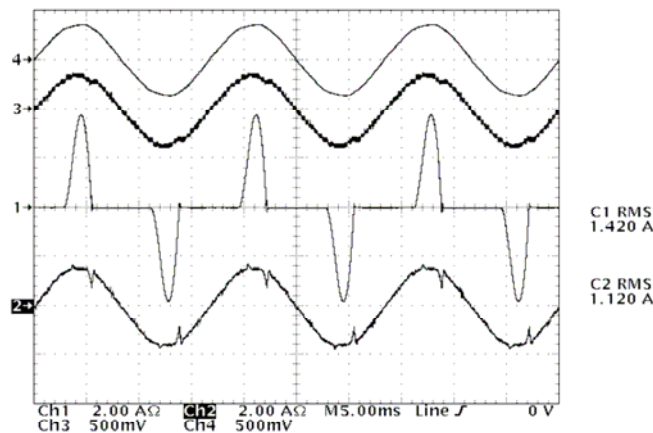


Figura 4.27 Formas de onda do FAP multinível: Tensão da rede, tensão de saída do FAP, corrente da carga e corrente da rede, após compensação.

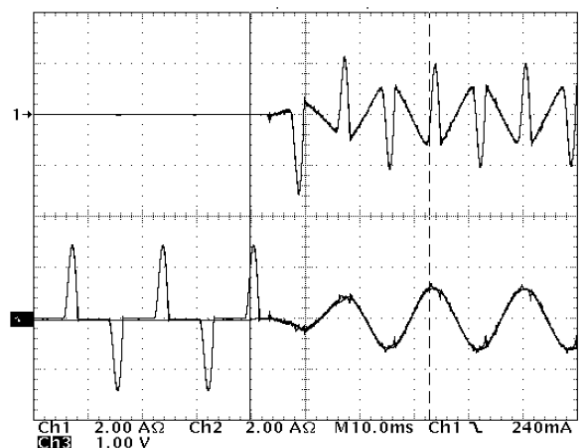


Figura 4.28 Formas de onda do FAP multinível no transitório. Acima, corrente produzida pelo inversor. Abaixo, corrente pela fonte.