

METODOLOGIAS PARA ESTIMAÇÃO DE FREQUÊNCIA

Gabrieli Pinarello Pizzolato¹

Eduardo Machado dos Santos²

Resumo:

Sendo a frequência um elemento fundamental para a eficiência de todo o Sistema Elétrico de Potência, os métodos de estimação de frequência se tornam fundamentais para garantir uma satisfatória qualidade de energia. Pequenas variações de frequência podem ocasionar diversos danos aos equipamentos eletrônicos, prejudicar o funcionamento de relés, influenciar na operação de motores síncronos e até mesmo ocasionar falhas no fornecimento de energia elétrica ao cliente final. Em regime permanente são admitidas variações de frequência de $\pm 0,5\text{Hz}$, o que demonstra o quanto pequenas variações podem ser prejudiciais ao sistema. Dentre inúmeras metodologias existentes para estimar a frequência, o presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica de quatro métodos, que são eles: Método dos Mínimos Quadrados, Método do Laço Fechado de Fase Digital, Método baseado na Transformada Discreta de Fourier de Macleod e Método de Prony. Além disso, os métodos contam com um parâmetro fundamental que são os índices de desempenho, que analisam o desempenho dos métodos para diferentes distúrbios, como por exemplo: sinal senoidal com harmônico, variações de sinal amortecidas, oscilações de potência dentre outros casos.

Palavras-chave: Frequência, estimação, métodos, energia.

Modalidade de Participação: Iniciação Científica

METODOLOGIAS PARA ESTIMAÇÃO DE FREQUÊNCIA

¹ Aluno de graduação. gabipp01@gmail.com. Autor principal

² Docente. eduardosantos@unipampa.edu.br. Orientador

METODOLOGIAS PARA ESTIMAÇÃO DE FREQUÊNCIA

1 INTRODUÇÃO

A estimação de frequência é de suma importância para a proteção e controle dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP), em consequência de crescentes distúrbios no sinal de tensão e variações da frequência fundamental (Thomas e Woolfson, 2001). Desta maneira, necessita-se de métodos de estimação que respondam de forma precisa na detecção de anomalias, para que estas sejam resolvidas e o sistema retorne a operar normalmente sem que haja nenhum dano.

Para obter uma energia considerada de boa qualidade, as tensões e frequências devem ser constantes e sua forma de onda não pode apresentar distorções harmônicas. Entretanto, segundo ONS (2008) são admitidas oscilações de frequência entre $\pm 0,5\text{Hz}$ em regime permanente, isso demonstra que pequenas variações da frequência fundamental afetam diretamente a qualidade de energia. Valores que extrapolam este limite podem gerar desequilíbrios entre geração de energia e demanda de carga. Se a demanda for maior que a geração resulta em baixas frequências, analogamente, se a geração for maior que a demanda o resultado são frequências altas. Além disso, variações de frequência influenciam na operação de motores síncronos, no funcionamento de relés e equipamentos eletrônicos, dentre outras aplicações que poderiam ser prejudicadas. Em suma, qualquer variação de frequência causa um desequilíbrio no SEP.

Atualmente existem diversos métodos de estimação de frequência e como ela é um elemento fundamental na qualidade de energia, busca-se constantemente desenvolver métodos cada vez mais eficazes.

O presente trabalho tem como objetivo fazer uma revisão bibliográfica de quatro métodos de estimação de frequência, são eles: Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), Método do Laço Fechado de Fase Digital (DPLL), Método baseado na Transformada Discreta de Fourier de Macleod (TDFM) e Método de Prony (MP).

2 METODOLOGIA

A partir das referências estudadas foram apresentados quatro métodos de estimação de frequência. Onde buscou-se apresentar de forma clara e sucinta a teoria em que cada método se baseia e a maneira como a frequência é obtida através de equações de cada metodologia.

Existem diversos métodos de estimação de frequência, por essa razão o critério adotado na escolha deles para realizar o presente trabalho é primeiramente fixar conceitos de métodos que já são bastante trabalhados, a fim de entender os mecanismos fundamentais para a estimação de frequência. Além disso, foram apresentados alguns índices de desempenho que são utilizados para verificar a eficiência dos métodos.

3 RESULTADOS e DISCUSSÃO

A seguir foram descritos quatro métodos de estimação de frequência, sendo eles Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), Método do Laço Fechado de Fase Digital (DPLL), Método baseado na Transformada Fourier de Macleod (TDFM) e Método de Prony (MP).

3.1 Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)

O método dos mínimos quadrados conta com diversas aplicações. Ao tratar de estimação de frequência, uma das principais vantagens é sua fácil implementação

computacional com a garantia da sua robustez. Outra característica deste método é sua simplicidade matemática, pois neste não é necessário o cálculo de matrizes inversas e de correlação.

Segundo Kwong e Johnston (1992), a frequência é obtida através da equação 1.

$$f_k = \frac{1}{2\pi \Delta t} \text{asen}(I_m(W_k)) \quad (\text{eq. 1})$$

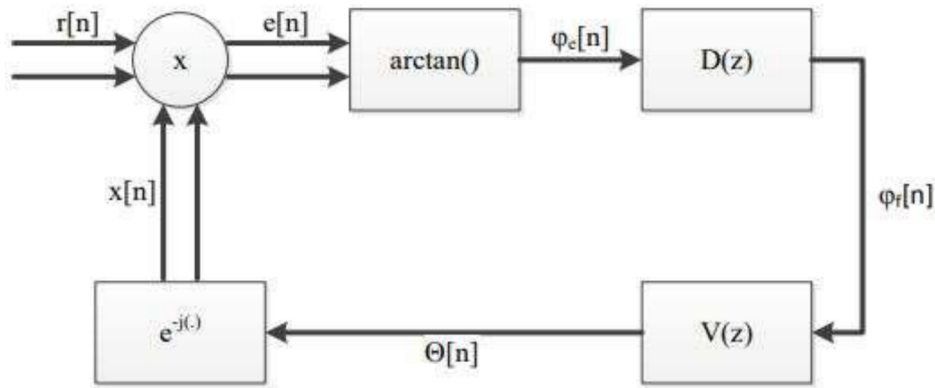
Onde o inverso da frequência de amostragem é representado por Δt , o valor da corrente de disparo ajustada por I_m e W_k é o valor obtido através do vetor.

3.2 Método do Laço Fechado de Fase Digital (DPLL)

Esta metodologia realiza a estimação de frequência a partir de um sinal complexo ($r[n]$). De acordo com a proposta de Sithamparamanathan (2008), a malha formada pelo método DPLL consiste em um detector de erro da fase ($e[n]$) composto por um multiplicador complexo e uma função trigonométrica arco tangente, bem como um filtro que é representado como a função de transferência $D(z)$ de acordo com a equação 2. Além disso, o laço conta com um Oscilador Controlado Numérico (OCN), o qual é equivalente ao oscilador controlado por tensão dado por $V(z)$ conforme a equação 3.

O sinal $r[n]$ recebido é multiplicado pela saída sintetizada do OCN, gerando o erro de fase. Este último será a entrada de uma função arco tangente que é responsável por estimar a diferença de fase entre o sinal recebido e o sinal local. O $e[n]$, então, passa pelo filtro e pelo acumulador de fase conforme a Figura 1.

Figura 1 – Malha DPLL.



Fonte: Marchesan, 2013.

$$D(z) = \frac{az}{z - (1-a)} \quad (\text{eq. 2})$$

$$V(z) = \frac{k}{z-1} \quad (\text{eq. 3})$$

Onde ΔT é o intervalo de amostragem e a é expresso pela equação 4.

$$a = \frac{4k}{k^2 + 2k + 2} \quad (\text{eq. 4})$$

Finalmente, a frequência estimada pelo método DPLL é dada pela equação 5.

$$f(t) = \frac{k}{2\pi \Delta T} \sum_{n=1}^{1+N} \phi f(n) \quad (\text{eq. 5})$$

3.3 Método Baseado na Transformada Fourier de Macleod (TDFM)

De acordo com Grimoni, Galvão e Udaeta (2004), o principal objetivo dessa técnica de estimação de frequência baseada na Transformada Discreta de Fourier é reduzir o erro médio da estimação. Para isso, faz-se o uso de três componentes do espectro de amostras $(A_{máx-1}, A_{máx}, A_{máx+1})$.

A frequência fundamental é obtida através da equação 6.

$$f(t) = \frac{(k_{máx} + \delta) fa}{N} \quad (\text{eq. 6})$$

Onde fa representa o valor da frequência aparente e $k_{máx}$ é o valor que possui maior amplitude no espectro de amostras das frequências. Já δ é dado por equação 7 e γ pela equação 8.

$$\delta = \frac{\sqrt{8\gamma^2 + 1} - 1}{4\gamma} \quad (\text{eq. 7})$$

$$\gamma = \frac{\text{Real}(A_{máx-1}, A_{máx}, A_{máx+1})}{\text{Real}(2|A_{máx}|^2 + A_{máx-1}A_{máx} + A_{máx+1}A_{máx})} \quad (\text{eq. 8})$$

3.4 Método de Prony (MP)

Como apresenta Marchesan (2013), essa metodologia filtra a componente fundamental da tensão através da Transformada Discreta de Fourier, conforme a equação 9.

$$g_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} V_{k+n-N+1} \cos(n\omega T) \quad (\text{eq. 9})$$

Onde o parâmetro V_k representa o valor da tensão no instante k . A resultante da tensão amostrada e filtrada (g_k) é utilizada para calcular a frequência, de acordo a equação 10. Para este cálculo, após diversos testes de valores para M e N o melhor desempenho fazendo o uso de $M=15$.

$$f_m = \frac{1}{2\pi T} \cos^{-1} \left\{ \frac{\sum_{m=2}^{M-1} (g_{m-1} + g_{m+1})^2}{2 \sum_{m=2}^{M-1} g_m (g_{m-1} + g_{m+1})} \right\} \quad (\text{eq. 10})$$

Ainda, este método possibilita a utilização de duas janelas a fim de melhorar o desempenho para valores de frequência que estão fora da fundamental. Além disso, essas janelas dão pesos diferentes a cada amostra processada pelo filtro de Fourier. Pode-se observar o comprimento da janela de Hamming na equação 11 e a janela de Blackman de acordo com a equação 12.

$$\omega_H = 0,54 - 0,46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad (\text{eq. 11})$$

$$\omega_B = 0,42 - 0,5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0,08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right) \quad (\text{eq. 12})$$

3.5 Índices de desempenho

A fim de definir qual metodologia é mais eficiente foram desenvolvidos índices de desempenho. Eles buscam facilitar a análise dos algoritmos, que podem ser implementados

nas metodologias estudadas e nas demais metodologias existentes. Vale ressaltar que um método pode ter bom desempenho para um determinado distúrbio de frequência e não responder tão bem para outros.

O tempo de convergência do método é definido pelo intervalo de tempo entre o instante em que ocorre variação de algum parâmetro no sinal e o instante de convergência. Já o *overshoot* define o maior valor de erro positivo na estimação antes da convergência. Existem ainda os índices de erro, como é o caso do erro médio.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A frequência é um parâmetro fundamental para a eficiência de todo o sistema elétrico de potência. Desequilíbrios de frequência podem ocasionar falhas no fornecimento de energia elétrica, causar danos aos componentes do sistema ou aos consumidores, e até mesmo perturbações na rede. Desta maneira, o presente trabalho mostrou a importância dos métodos de estimação de frequência que estão diretamente relacionados com a qualidade de energia.

Existem inúmeras metodologias que podem ser utilizadas para estimar a frequência, nessa revisão bibliográfica foram estudados métodos já consolidados, a fim de formar um bom embasamento ao tema. Ainda, para melhor analisar o comportamento do método quando exposto a diferentes distúrbios conta-se com os índices de desempenho, que respondem de acordo com a eficácia do método.

O objetivo para trabalhos futuros é realizar a implementação em *software* de diversos métodos de estimação de frequência, a fim de verificar seu comportamento através dos índices de desempenho quando submetidos a diferentes distúrbios, como: variações de sinal amortecidas, oscilações de potência, sinal senoidal com harmônico, dentre outros casos.

REFERÊNCIAS

GRIMONI, J.; GALVÃO, L.; UDAETA, M. **Iniciação a Conceitos de Sistemas Energéticos para o Desenvolvimento Limpo**, Edusp. 2004.

KWONG, M.; JOHNSTON, E. A variable step size LMS algorithm, **IEEE Signal e Processing**, IEEE Transactions on, 1992.

MARCHESAN, G. **Estimadores de frequência aplicados a sistemas elétricos de potência**. 2013. Dissertação (Mestrado em Concentração e Processamento de Energia) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2013.

ONS, Procedimento de Rede, Submódulo 25.6. **Indicadores de qualidade de energia elétrica frequência e tensão**, 2008.

SITHAMPARANATHAN, K. Digital-PLL Assisted Frequency Estimation with Improved Error Variance, **Global Telecommunications Conference, 2008**. IEEE GLOBECOM 2008. IEEE, vol., no., pp 1-5, Nov. 302008-Dec. 4 2008.

THOMAS, D.; WOOLFSON, M. Evaluation of frequency tracking methods, **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2001. IEEE, vol. 16, pp. 367–371, July 2001.