

Filtro de Memória de Tensão de Sequência Positiva para Uso em Relés Numéricos Microprocessados

Kleber M. Silva e Maria Leonor S. Almeida

Resumo—Este artigo descreve detalhadamente a implementação de um filtro de memória de tensão de sequência positiva para aplicação em relés numéricos microprocessados. Para tanto, realiza-se o mapeamento de um filtro analógico passa-baixas de primeira ordem em um filtro digital de resposta ao impulso infinita, utilizando-se o método de diferenças regressivas. Também são discutidas as diferenças necessárias para implementação do filtro proposto quando utilizado com algoritmos de estimação de fasores recursivos e não recursivos. Como exemplo de aplicação, o desempenho do filtro proposto ainda é analisado quando empregado em conjunto com a função de proteção de distância, na forma do comparador de fase que implementa a característica de operação Mho. Para as análises, o software *Alternative Transients Program* (ATP) foi empregado para simular uma linha de transmissão de 500 kV e 200 km quando submetida a curtos-circuitos internos e externos. Os resultados obtidos mostram que a constante de tempo de decaimento da resposta transitória pode ser facilmente ajustada no filtro proposto, fornecendo um meio simples e estável para ajustar de forma adaptativa a polarização por memória de tensão de sequência positiva das funções de proteção implementadas em relés numéricos microprocessados.

Palavras-chave—Memória de tensão de sequência positiva, filtro de resposta ao impulso infinita, memória de tensão adaptativa.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de potência têm evoluído de pequenos sistemas isolados para os de grande porte com operação interligada. Essa mudança na configuração dos sistemas elétricos tem contribuído para um crescente aumento na complexidade da proteção empregada, uma vez que as contribuições de corrente de curto-circuito vindas das diferentes partes do sistema podem apresentar diferentes direções, a depender da configuração do sistema elétrico e de suas condições de operação.

De fato, a correta definição da direcionalidade também é necessária em proteções fundamentadas no sinal de tensão, as quais precisam utilizar referências confiáveis de tensão para garantir sua correta operação com maior sensibilidade e segurança [1]. Atualmente, os relés numéricos têm obtido essa confiabilidade por meio do emprego de diferentes estratégias de polarização de tensão, sendo a mais comumente usada a polarização por memória de tensão de sequência positiva. Esta estratégia apresenta melhor comportamento frente a todos os tipos de faltas, mesmo aquelas com tensões próximas de zero ou mesmo em situações nas quais observa-se inversão de fase das tensões, o que pode ocorrer em linhas de transmissão com compensação série [2].

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido da Capes.

Kleber M. Silva é professor Adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica na Universidade de Brasília (UnB). Email:klebermelo@unb.br.

Maria Leonor S. Almeida é aluna de doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade de Brasília (UnB). Email: mlsalmeida@aluno.unb.br.

A utilização de filtros de memória de tensão de sequência positiva é proposta em algumas poucas referências sobre relés numéricos microprocessados [3]–[5]. Todavia, na sua maioria, elas correspondem a artigos técnicos ou patentes de fabricantes, de modo que não são apresentados os detalhes de implementação dos filtros analisados, o que dificulta sua reprodução. De fato, aspectos como a influência da taxa de amostragem na escolha da constante de tempo da memória e a combinação do filtro com algoritmos de estimação de fasores recursivos e não-recursivos não são sequer mencionados, o que inviabiliza um controle do valor exato da constante de tempo de decaimento do filtro de memória.

Neste contexto, apresenta-se neste artigo a implementação detalhada do filtro de memória de tensão de sequência positiva adaptativa proposto em [6]. Esse filtro é projetado com base no mapeamento de um filtro analógico passa-baixas de primeira ordem em um filtro digital de resposta ao impulso infinita (do inglês *infinite impulse response* - IIR), utilizando-se o método de diferenças regressivas (do inglês *backward difference*). O desempenho do filtro é avaliado tanto em termos do fasor como do sinal de tensão instantâneo que ele pode apresentar na saída. Em se tratando de fasores, foram investigados as diferenças necessárias na implementação do filtro descrito quando utilizado com algoritmos de estimação recursivos e não recursivos. A aplicação do filtro também é analisada quando empregado juntamente com a função de proteção de distância. Os resultados obtidos mostram que a constante de tempo de decaimento da resposta transitória pode ser facilmente ajustada no filtro de memória proposto, fornecendo um meio simples e estável para ajustar de forma adaptativa a polarização por memória de tensão de sequência positiva de relés numéricos microprocessados.

II. PROJETO DO FILTRO DE MEMÓRIA PROPOSTO

O filtro memória de tensão de sequência positiva apresentado nesse artigo – inicialmente proposto em [6] – corresponde a uma estratégia adaptativa, a qual possibilita o ajuste da constante de tempo de decaimento a depender das condições de operação do sistema. Assim, para que o filtro opere com memória longa, emprega-se uma constante de tempo lenta (na ordem de 100 ciclos), que mantém a referência de tensão confiável na saída do filtro por mais tempo. Todavia, para que o filtro opere com memória curta, utiliza-se uma constante de tempo rápida (na ordem de 0,1 ciclo), a qual atualiza rapidamente a memória para cada nova situação de operação do sistema avaliado.

Ressalta-se que o controle adaptativo da memória empregada pelo filtro é essencial, uma vez que ele garante o

correto comportamento do sistema de proteção nas diferentes condições de funcionamento. Por exemplo, o filtro pode ser ajustado para operar com memória longa em situações de curtos-circuitos que resultam em tensões nas fases defeituosas próximas de zero. Além disso, a memória longa também pode ser empregada em casos de problemas de inversão de tensão em linhas com compensação série. Por outro lado, o mesmo filtro pode ser adaptado para operar com memória curta após a energização de linhas de transmissão, assegurando assim que a proteção se adeque rapidamente para a nova configuração do sistema. A memória curta também é empregada durante oscilações de potência, a fim de evitar a operação indevida das funções de proteção em decorrência da excursão de frequência que o sistema pode experimentar [4], [5].

Ademais, a memória adaptativa desenvolvida mantém o ângulo de tensão praticamente estável após a ocorrência de curtos-circuitos, o que é fundamental para garantir o bom funcionamento dos elementos de proteção que empregam a tensão como referência para verificação da direcionalidade das correntes de curto-circuito.

Para melhor entendimento da estratégia adaptativa implementada, descreve-se a seguir o desenvolvimento do filtro de memória de tensão proposto em [6].

Considere o filtro analógico passa-baixas de primeira ordem com função transferência $H(s)$ descrita em (1).

$$H(s) = \frac{\tau^{-1}}{s + \tau^{-1}}, \quad (1)$$

na qual τ é a constante de tempo de decaimento da resposta transitória.

Dentre os vários métodos de mapeamento de $H(s)$ do domínio s para o domínio z , emprega-se o método das diferenças regressivas (do inglês *backward differences*), pois ele não necessita de entradas em instantes anteriores, o que simplifica a equação de diferença resultante [7]. Assim, o mapeamento descrito em (2) é aplicado:

$$s = \frac{1 - z^{-1}}{\Delta t}, \quad (2)$$

sendo $\Delta t = \frac{1}{Nf}$ o intervalo de amostragem e f a frequência fundamental.

A substituição de (2) em (1) resulta, após manipulações algébricas, na função de transferência mapeada $H(z)$ do filtro digital IIR, definida como:

$$H(z) = \frac{1}{(MN + 1) - MNz^{-1}}, \quad (3)$$

sendo M a constante de decaimento em número de ciclos.

Nota-se a partir de (3) que $H(z)$ possui um único pólo p , determinado por:

$$p = \frac{MN}{MN + 1}. \quad (4)$$

Uma vez que M e N são necessariamente positivos, o polo p permanece dentro do ciclo unitário, garantindo assim estabilidade ao filtro de memória [7].

A função de transferência de mapeamento $H(z)$ também é definida por:

$$H(z) = \frac{\hat{V}_{1m}(z)}{\hat{V}_1(z)}, \quad (5)$$

sendo $\hat{V}_{1m}$ o fasor tensão de sequência positiva memorizado, correspondente a saída do filtro; e $\hat{V}_1$ o fasor de sequência positiva, calculado em (6), como sendo igual a entrada do filtro.

$$\hat{V}_1(k) = \frac{1}{3} [\hat{V}_A(k) + a^2 \hat{V}_B(k) + a \hat{V}_C(k)], \quad (6)$$

na qual $\hat{V}_A$, $\hat{V}_B$ e $\hat{V}_C$ são os fasores de tensão nas fases A, B e C, respectivamente; $a = 1 \angle 120^\circ$ é uma constante complexa; e k refere-se ao k -ésimo instante de amostragem.

Substituindo (3) em (5), e transformando do domínio z para o domínio do tempo discreto, tem-se o seguinte desenvolvimento:

$$[(MN + 1) - MNZ^{-1}] \hat{V}_{1m}(z) = \hat{V}_1(z), \quad (7)$$

$$(MN + 1) \hat{V}_{1m}(k) - MN \hat{V}_{1m}(k - 1) = \hat{V}_1(k), \quad (8)$$

$$\hat{V}_{1m}(k) = \frac{1}{MN + 1} \hat{V}_1(k) + \frac{MN}{MN + 1} \hat{V}_{1m}(k - 1). \quad (9)$$

De (9), define-se o fator de esquecimento α , calculado como:

$$\alpha = \frac{1}{MN + 1}. \quad (10)$$

Assim, a saída do filtro fasor tensão de sequência positiva memorizado $\hat{V}_{1m}$ é definida pela equação de diferença (11). Ressalta-se que os fasores tensões memorizadas nas demais fases são definidos fundamentado em $\hat{V}_{1m}$ e na sequência de fases adotada.

$$\hat{V}_{1m}(k) = \alpha \hat{V}_1(k) + (1 - \alpha) \hat{V}_{1m}(k - 1). \quad (11)$$

Tendo como base o valor de $\hat{V}_{1m} = V_{1m} \angle \varphi_{1m}$ e considerando o deslocamento angular de amostragem $\theta = \frac{2\pi}{N}$, o valor instantâneo da tensão de sequência positiva memorizada é facilmente definido por:

$$v_{1m}(k) = V_{1m}(k) \sin[k\theta + \varphi_{1m}(k)]. \quad (12)$$

A determinação do valor da constante de decaimento M é uma escolha determinante para a definição da estratégia adaptativa do filtro memorizado. Essa escolha deve tipicamente considerar o tempo de extinção dos curtos-circuitos com tensões próximas a zero, sejam eles internos ou externos, e também o tempo de manobra para retirada dos capacitores das compensações séries [2].

Neste trabalho, avalia-se o seguinte esquema de adaptação para o valor de M : após a energização, o valor de M é igualado a 0,1 por tempo suficiente (aproximadamente 1 ciclo) para que o fator de esquecimento α tenha valor reduzido e $\hat{V}_{1M}$ cresça rapidamente até seu valor nominal. Uma vez carregada a memória de tensão, assegura-se a sensibilidade da proteção para quaisquer variações na potência transferida por meio do emprego da memória curta, com $M = 10,0$. Na ocorrência de um defeito que reduza $\hat{V}_1$ para um valor menor que 0,1 pu da tensão nominal, a memória longa deve ser ativada por meio do aumento no valor da constante de decaimento que

passa a ser igual a 100 ($M = 100,0$). Isso faz com que α aumente seu valor e, consequentemente, o valor de $\hat{V}_{1M}$, antes da redução de $\hat{V}_1$, permaneça por mais tempo e, portanto, evite atuações indevidas da proteção. Vale destacar que a determinação para ativar a memória longa somente quando $\hat{V}_1$ reduzir seu valor para menos de 0,1 pu da tensão nominal corresponde a uma escolha baseada em valores utilizados por diferentes fabricantes.

Salienta-se que a estratégia adaptativa do filtro torna sua implementação adequada também para casos nos quais o religamento monopolar é adotado. Nessas condições, assim que ocorrer o desligamento da fase defeituosa, o valor da constante de tempo é alterado para $M = 0,1$, de maneira tal que a tensão memorizada de sequência positiva passa a ser calculada considerando as tensões nas duas fases sãs. Apenas após o carregamento da memória de tensão, M passa a ser igual a 10,0 ciclos, proporcionando uma referência de tensão confiável para a detecção de falhas durante o tempo morto da linha de transmissão. Em seguida, o processo de religamento monopolar prossegue com o fechamento do disjuntor da fase defeituosa, fazendo com que a constante de tempo modifique seu valor para M que seja igual a 0,1 ciclo com o intuito de recarregar a memória de tensão rapidamente e, por fim, ela é definida como $M = 10,0$ durante a operação em regime permanente.

Além do religamento monopolar, o emprego do filtro adaptativo em questão também é vantajoso durante situações de oscilações de potência, uma vez que nessas condições a variação da potência não é abrupta e, em geral, a queda de tensão não é tão severa. Assim, o algoritmo adaptativo descrito permaneceria com memória curta, o que asseguraria a sensibilidade da proteção, impedindo, assim, possíveis erros de atuação causados por alterações na frequência.

É importante mencionar que outras estratégias de adaptação poderiam ser usadas para manter a estabilidade da memória de tensão dos casos analisados neste artigo. No entanto, avaliou-se apenas a estratégia do filtro memória de tensão de sequência positiva, o que não quer dizer que ela deva ser necessariamente usada para todos os casos.

III. ESTIMAÇÃO DE FASORES

Para implementar o filtro de memória de tensão de sequência positiva descrito em [6], deve-se calcular os fasores de tensão. Dessa maneira, a escolha pelo algoritmo de estimação de fasor deve considerar se o mesmo é classificado como recursivo ou não-recursivo, pois esta diferença influencia no correto comportamento do filtro.

Nos algoritmos recursivos, para cada nova amostra, somente uma atualização do último fasor é necessária. Então, para um sinal senoidal em regime permanente, os fasores estimados permanecem estacionários, de maneira que podem ser diretamente usados [8].

Nos algoritmos não recursivos, por sua vez, para cada nova amostra é necessário realizar um completo processo de multiplicação e soma dos coeficientes. Como resultado, o fasor estimado para um sinal senoidal em regime permanente terá uma magnitude constante e rotacionará no sentido anti-horário

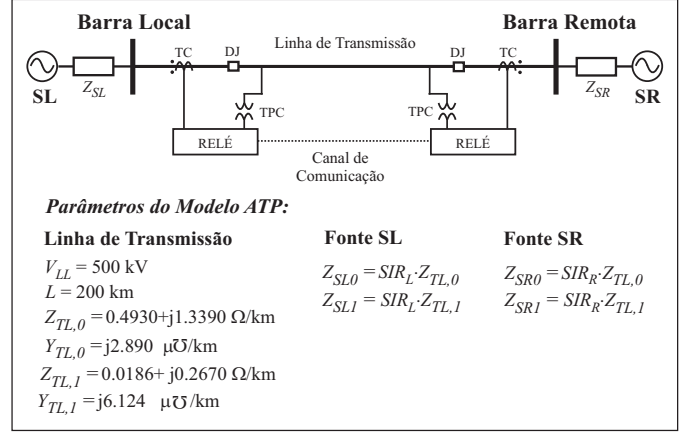


Figura 1. Modelo do sistema elétrico de potência utilizado.

de um deslocamento angular de amostragem correspondente a θ a medida que a janela de dados avança a cada nova amostra. Nesse contexto, caso os fasores estimados por um algoritmo não-recursivo sejam aplicados diretamente em uma soma, cujas parcelas são definidas para instantes diferentes, o defasamento θ fará com que o resultado obtido seja incorreto [8].

Como a tensão de sequência positiva é calculada por meio de um filtro IIR (conforme descrito em (11)), antes de sua utilização deve-se corrigir a fase do fasor calculado por algoritmos de estimação não-recursivos, pois, caso contrário, a soma de fasores com referências de fase diferentes resultaria em um erro. Essa correção pode ser efetuada aplicando-se a transformação linear de rotação descrita:

$$\begin{bmatrix} Y_{re}(k) \\ Y_{im}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k\theta) & \sin(k\theta) \\ -\sin(k\theta) & \cos(k\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{re}(k) \\ X_{im}(k) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

na qual X_{re} e X_{im} são as partes real e imaginária do fasor original, respectivamente; Y_{re} e Y_{im} são as partes real e imaginária do fasor rotacionado, nesta ordem.

Neste trabalho, opta-se pela utilização do chamado algoritmo Filtro Cosseno Modificado, cuja resposta elimina adequadamente a componente de decaimento exponencial [9]. Sendo este um algoritmo não-recursivo, e devido ao emprego da memória de tensão de sequência positiva que realiza a soma de fasores em instantes diferentes, conforme apresentado na Equação (11), deve-se efetuar a correção descrita em (13).

IV. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO FILTRO PROPOSTO

A avaliação do desempenho do algoritmo proposto em [6] foi realizada empregando-se o ATP para a simulação da operação da linha de transmissão presente no sistema elétrico ilustrado na Fig. 1 quando submetida a curtos-circuitos internos e externos.

Na Fig. 1, as fontes do terminal local e remoto, representadas por SL e SR, respectivamente, são ideais e possuem seus parâmetros definidos com base na razão entre as impedâncias da fonte e da linha (do inglês, *Source Impedance Ratio*) chamada de SIR_L para o terminal local e SIR_R para o terminal remoto. A linha de transmissão é de 500 kV, 200 km e foi modelada como perfeitamente transposta a parâmetros distribuídos constantes na frequência [10]. Os transformadores

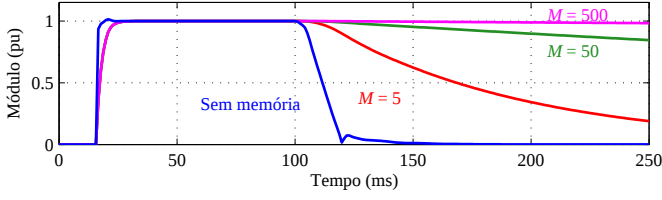


Figura 2. Comportamento da memória de tensão a depender doo valor de M .

para instrumentos empregados são os mesmos em ambos os terminais, sendo que os TCs são do tipo C800 2000-5 A, com modelagem e parâmetros descritos em [11], e os modelos dos TPCs são apresentados em [12]. Ressalta-se que os subíndices 0 (zero) e 1 (um) correspondem às componentes de sequência zero e positiva, nessa ordem.

Para as simulações, considerou-se no ATP um passo de integração correspondente a uma taxa de amostragem de 1600 amostras por ciclo. Além disso, os sinais de saída foram processados por meio de um Filtro Butterworth passa baixas *anti-aliasing* de terceira ordem, com frequência de corte de 180 Hz. Então os sinais de saída foram reamostrados a uma taxa de 16 amostras por ciclo ($N = 16$), antes de serem utilizados no filtro de memória.

Com o intuito de investigar a influência do valor de M , considera-se que a memória de tensão é habilitada em 0 ms, após a energização do sistema, e ocorre um curto-circuito trifásico franco próximo a barra local da Fig. 1. Nesse caso, o sistema opera com a fonte local forte, fonte remota fraca ($SIR_L = 0,1$ e $SIR_R = 1,0$) e sem carregamento. Destaca-se que para essa situação de curto-circuito, os sinais de tensão adquiridos nas fases são aproximadamente nulos e, consequentemente, a tensão sequência de positiva também aproxima-se de zero.

A Fig. 2 apresenta o comportamento adaptativo do filtro memória de tensão para uma situação de energização da linha de transmissão, seguido de um curto-circuito. Para essa simulação, considera-se que o valor de M logo após a energização é mantido igual a 0,1. Todavia, após a ocorrência do curto-circuito em 100 ms, o valor de M é variado, podendo ser igual a 0 (ou sem memória), 5, 50 ou 500.

Nota-se da Fig. 2 que após a energização da linha, o valor do módulo de $\hat{V}_{1M}$ cresce rapidamente até seu valor nominal, em função do emprego da memória curta. Isso é possível igualando-se M a 0,1 por tempo suficiente (aproximadamente 1 ciclo) para que o fator de esquecimento α tenha valor elevado (próximo de 1). Como α é alto, prevalece a primeira parcela da equação (11) e, portanto, o módulo de $\hat{V}_{1M}$ atualiza rapidamente seu valor, fazendo com que $\hat{V}_{1m}$ seja aproximadamente igual a $\hat{V}_1$.

Após a ocorrência do curto-circuito, as tensões nas fases são aproximadamente iguais a zero, o que causa uma redução no valor do módulo de $\hat{V}_1$ para menos que 0,1 pu da tensão nominal. Nessa condição, objetiva-se ativar a memória longa, o que ocorre por meio da alteração do valor de M , a qual irá influenciar diretamente no valor do fator de esquecimento α e, portanto, no comportamento de $\hat{V}_{1M}$, conforme apresentado na Fig. 2. Observa-se que para menores valores de M , a tensão de sequência positiva reduz seu módulo mais rapidamente,

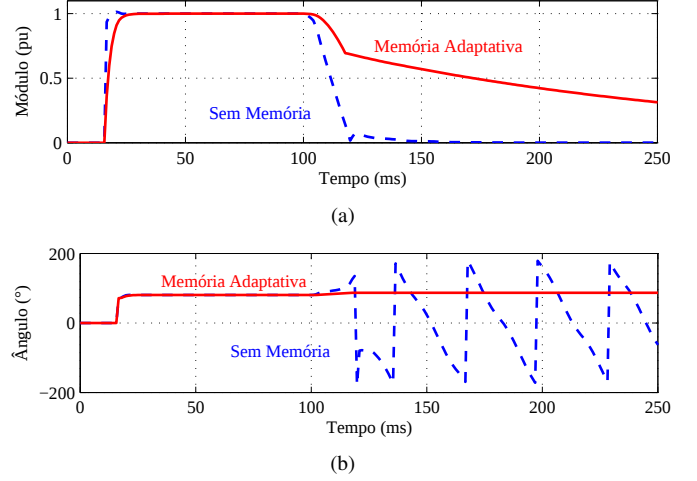


Figura 3. Comportamento do fasor tensão sem memória e com memória adaptativa: (a) Módulo; (b) Ângulo.

devido aos elevados valores de α , fazendo com que prevaleça a primeira parcela da soma que define $\hat{V}_{1m}$ (descrita na equação (11)). Destaca-se que a curva em azul corresponde ao módulo do fasor tensão de sequência positiva sem memorização ($M = 0$), a qual não emprega a polarização de tensão e, por isso, reduz seu valor para zero mais rapidamente.

Comportamento contrário é verificado quando emprega-se maiores valores de M : nota-se que o módulo do fasor tensão de sequência positiva reduz seu valor mais lentamente. Isso porque o fator de esquecimento α terá valores próximos de 0, fazendo com que prevaleça a segunda parcela da soma que define $\hat{V}_{1m}$ e, consequentemente, o módulo do fasor tensão de sequência positiva memorizada antes do curto-circuito permaneça por mais tempo. Destaca-se da Fig. 2 que a curva em rosa corresponde ao maior valor de M , tal que a $\hat{V}_{1M}$ praticamente não altera seu valor, ainda que as tensões nas fases sejam próximas de zero após o curto-circuito.

As Figs. 3(a) e 3(b) apresentam o módulo e o ângulo, respectivamente, do perfil do fasor tensão para o curto-circuito supramencionado considerando o fasor tensão de sequência positiva sem memória e com memória adaptativa (considerando a memória longa para M igual a 100,0 ciclos). Da Fig. 3(a), verifica-se da curva em azul tracejada, correspondente ao módulo do fasor tensão de sequência positiva sem memória, que após a ocorrência do curto-circuito $|\hat{V}_1|$ reduz seu valor rapidamente para zero. Todavia, a curva em vermelho, correspondente ao fasor tensão de sequência positiva memorizada, ilustra que o valor de $|\hat{V}_{1M}|$ antes da redução permanece por mais tempo. Esse comportamento adaptativo do fasor tensão de sequência positiva memorizada é vantajoso, uma vez que evita a perda de referências confiáveis de módulo.

Em proteções que empregam polarização por memória de tensão, é comum que suas funções sejam desabilitadas, após a energização das linhas, por tempo suficiente para que sua memória seja carregada. Nesse período, a linha de transmissão é normalmente protegida pela função SOTF [8]. Assim, o atraso inicial de 1 ciclo observado na Fig. 3(a) após a habilitação da memória adaptativa é aceitável, sendo que nesse intervalo a proteção da linha é efetuada apenas pela função SOTF.

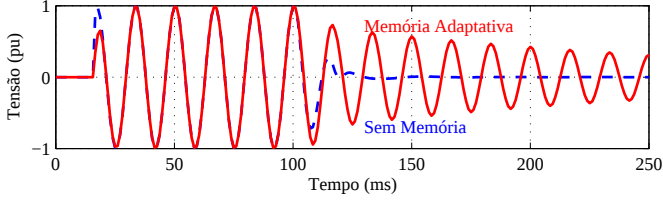


Figura 4. Comportamento da tensão instantânea com e sem o uso de memória adaptativa.

Da Fig. 3(b), nota-se que o ângulo do fasor tensão sem memória possui variações significativas, enquanto a fase do fasor tensão memorizada permanece praticamente constante após a ocorrência de curto-circuito. Em elementos de proteção que empregam a direcionalidade, mudanças na fase são prejudiciais, pois estão associadas a inversões de tensão, que normalmente acarretam em atuações incorretas da proteção. Assim, o emprego do filtro adaptativo também é vantajoso em relação ao comportamento da fase do fasor tensão.

Conforme descrito em (12), a tensão de sequência positiva também pode ser visualizada em termos de valores instantâneos de tensão. A Fig. 4 apresenta o comportamento da tensão de sequência positiva memorizada instantânea correspondente ao fasor indicado na Fig. 3. Nota-se que, assim como verificado anteriormente para o fasor tensão memorizada, a tensão instantânea memorizada que emprega memória adaptativa não reduz abruptamente seu valor a zero após a ocorrência do curto-circuito, o que ocorre com a tensão instantânea sem memorização.

Exemplos da aplicação do filtro memória de tensão de sequência positiva proposto são apresentados nas Figs. 5(a) e 5(b). Nesses dois casos, avalia-se a proteção de distância para linhas de transmissão, por meio da avaliação comparativa do comportamento dos comparadores de fase Mho auto-polarizado, que emprega $\hat{V}_1$ como tensão de polarização, e Mho polarizado, que considera a saída do filtro $\hat{V}_{1m}$ como tensão de polarização. Considerando então a atuação da proteção de distância, define-se que para um curto-circuito interno (direto), o módulo do ângulo do comparador é menor que 90° , de maneira tal que o relé deve enviar um *trip* de operação. Por outro lado, para um curto-circuito externo (reverso), o módulo do ângulo do comparador é maior que 90° , fazendo com que a atuação da proteção de distância seja bloqueada [2].

O comportamento dos comparadores são avaliados com base nas Figs. 5(a) e 5(b), os quais ilustram, respectivamente, um curto-circuito trifásico interno imediatamente após o TC local e um curto-circuito trifásico externo imediatamente antes do TC local. Consideram-se que esses curtos-circuitos ocorrem em 200 ms, e que o sistema opera com a fontes local e remota fortes ($SIR_L = 0,1$ e $SIR_R = 0,1$) e sem carregamento.

Verifica-se que tanto para o caso de curto-circuito direto quanto reverso, devido à abrupta redução no valor da tensão (que torna-se aproximadamente igual a zero), o comparador de fase Mho auto-polarizado, correspondente a curva em azul tracejada e definido pela tensão de sequência positiva sem memória, não fornece uma indicação confiável da direção do curto-circuito. Como resultado, tem-se o comprometimento da atuação da proteção de distância.

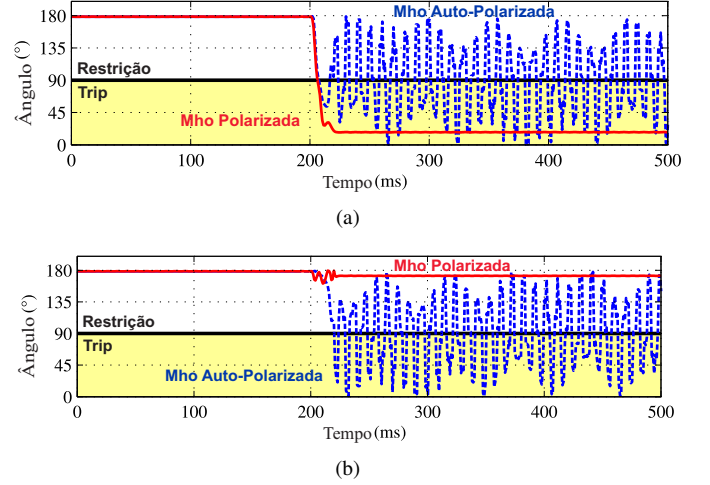


Figura 5. Ângulo de saída dos comparadores Mho Polarizada e Mho Auto-Polarizada para um curto-circuito: (a) interno; (b) externo.

Em contrapartida, o comparador de fase Mho polarizada, definido com base na tensão de sequência positiva memorizada, correspondente a curva em vermelho, apresenta um comportamento estável e confiável tanto para o caso de curto-circuito direto quanto reverso. Isso ocorre devido ao emprego da memória longa, a qual assegura referências confiáveis de módulo e ângulo de tensão. Dessa forma, verifica-se que o comparador de fase mho polarizada garante uma operação de proteção de distância adequada o suficiente para curtos-circuitos internos e externos, devido à estratégia de adaptação da constante de tempo de memória.

V. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta o desenvolvimento detalhado do filtro memória de tensão de sequência positiva adaptativa proposto em [6]. Os resultados obtidos mostraram que a estratégia adaptativa na determinação da constante de tempo de decaimento da memória garante uma operação adequada da proteção de distância para curtos-circuitos internos e externos. Isso ocorre porque o filtro de memória assegura a correta direcionalidade da tensão envolvida no curto-circuito, mesmo em condições críticas de atuação, como curtos-circuitos próximos aos terminais da linha de transmissão, os quais resultam em tensões de fase próximas de zero. Verifica-se ainda que a memória de tensão avaliada garante a correta operação da proteção durante a manobra de energização da linha.

Muito embora não tenham sido apresentados neste artigo casos de operação durante oscilações de potência, mostra-se que a polarização por memória de tensão de sequência positiva não altera o valor da constante de decaimento quando não há uma redução do módulo da tensão de sequência positiva para menos de 10% da tensão nominal. Dessa forma, o filtro de memória não é capaz de gerar operações indevidas da proteção causadas pela variação de frequência durante oscilações de potência [4], [5]. Além disso, observa-se que o filtro adaptativo é capaz de alterar o valor da tensão com tempo mínimo de atraso o que assegura a correta operação da proteção em situações de religamento monopolar e também

em condições de inversão de tensão, características de sistemas com compensação série [2].

Os resultados obtidos comprovam que a constante de tempo de decaimento da resposta transitória pode ser facilmente ajustada no filtro proposto em [6], fornecendo um meio simples e estável para ajustar de forma adaptativa a polarização por memória de tensão de sequência positiva de relés numéricos microprocessados.

REFERÊNCIAS

- [1] G. Ziegler, *Numerical Distance Protection: Principles and Applications*, 2nd ed. Berlin, Germany: Siemens, 2006.
- [2] CICRÉ, "Modern techniques for protecting and monitoring of transmission lines," Paris, FR, Tech. Rep., 2011.
- [3] J. B. Roberts and D. Hou, "Adaptive polarizing memory voltage time constant," Patent US005 790 418, 1998.
- [4] D. Hou, A. Guzmán, and J. Roberts, "Innovative solutions improve transmission line protection," Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, Tech. Rep., 1998.
- [5] H. J. A. Ferrer and I. Edmund O. Schweitzer, "Modern solutions for protection, control and monitoring of electronic power system," Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, Tech. Rep., 2010.
- [6] K. M. Silva and M. L. S. Almeida, "Positive sequence voltage memory filter for numerical digital relaying applications," *Electronics Letters*, vol. 51, no. 21, pp. 1697–1699, 2015.
- [7] K. Ogata, *Discrete-Time Control Systems*, 2nd ed. Minnesota, USA: Prentice Hall, 1995.
- [8] A. Phadke and J. Thorp, *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*, 1st ed. New York, USA: Springer, 2008.
- [9] D. G. Hart, D. Novosel, and R. A. Smith, "Modified cosine filters," Patent US00 615 487A, 2000.
- [10] *ATP - Alternative Transient Program*, Leuven EMTP Center, Herverlee, Belgium, 1987.
- [11] *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*, IEEE Power System Relaying Committee, 2004. [Online]. Available: <http://www.pes-psrc.org>
- [12] E. Pajuelo, G. Ramakrishna, and M. S. Sachdev, "Phasor estimation technique to reduce the impact of coupling capacitor voltage transformer transients," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 2, 2008.