

Análise no Plano Alfa da Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão com Compensação Série

Olaia P. Diniz e Kleber M. Silva

Resumo—Este artigo apresenta uma análise no plano alfa (plano- α) de correntes do desempenho da função de proteção diferencial aplicada às linhas de transmissão (LTs) com compensação série. Para tanto, considerou-se tanto os elementos diferenciais de fase como os de sequências negativa e zero. Utilizando o software *Alternative Transient Program* (ATP), foi simulado um sistema elétrico de potência constituído de dois equivalentes de Thévenin conectados por uma LT de 500 kV, 400 km e contendo um banco de capacitores série em cada extremidade. O esquema de proteção do banco de capacitores série constituído da combinação de MOV, GAP e circuito de amortecimento também foi incluído na simulação, bem como as lógicas de disparo do GAP, as quais foram implementadas utilizando-se a linguagem MODELS do ATP. Diversas situações de curto-circuito foram avaliadas, a partir das quais são apresentadas análises inovadoras do comportamento no plano- α relativo à função de proteção diferencial aplicada à LTs com compensação série. De tal forma, este trabalho visa agregar à literatura uma modelagem alternativa de simulações que possibilitem análises de sensibilidade paramétrica, além das simulações em regime transitório amplamente utilizadas.

Palavras-chave—Proteção diferencial, plano- α de correntes, linhas de transmissão com compensação série.

I. INTRODUÇÃO

FRENTE ao crescente aumento da demanda por energia elétrica, torna-se essencial transmitir maiores blocos de energia, mas sem comprometer a segurança e a estabilidade dos sistemas elétricos de potência. Dentre as principais alternativas utilizadas para aumentar a capacidade de transmissão do sistema está a instalação de bancos de capacitores série em LTs, devido à sua relação custo-benefício de instalação e manutenção. Todavia, muito embora essa seja uma boa alternativa no que concerne à operação em regime permanente do sistema elétrico, não raro ela apresenta desafios para a sua proteção, tais como situações de inversão de corrente e de tensão, impedância de fase desbalanceada, oscilações subsíncronas, etc. De fato, diante dessas situações, as funções de proteção, em especial a diferencial, podem perder sua capacidade de segurança e confiabilidade [1].

Com o crescimento do sistema interligado nacional (SIN) e da demanda proveniente dos grandes centros consumidores, torna-se essencial a utilização de projetos de proteção mais robustos e que garantam a eliminação de defeitos da forma mais rápida e seletiva. Esses esquemas de proteção devem ser sensíveis o suficiente para garantir a confiabilidade necessária

e a integridade dos equipamentos envolvidos, evitando-se desligamentos desnecessários e desencadeados devido à sua má coordenação de atuação [2].

Com o emprego de relés numéricos microprocessados em conjunto com sistemas de comunicação via fibras ópticas cada vez mais modernos, a utilização da função diferencial de corrente tem se tornado bastante atrativa na aplicação da proteção de LTs [3], [4]. Nesta conjuntura, foram propostos na literatura vários aperfeiçoamentos da função diferencial de LTs (código ANSI 87L). Dentre as melhorias, em [5], propõe-se a utilização de uma característica de restrição modificada no plano- α , o qual se baseia nos coeficientes representados neste plano complexo da razão entre as correntes de ambos os terminais de uma LT. Em [6], apresenta-se o plano- α baseado nas correntes de sequências negativa e zero, respectivamente com códigos ANSI 87LQ e 87LG, no intuito de tornar a proteção mais sensível frente a curtos-circuitos assimétricos e com alta impedância de falta.

Em [7], [8], são retratadas análises da proteção diferencial avaliadas na característica de restrição modificada do plano- α para LTs sem compensação série. Também são mostrados os equacionamentos pertinentes, e, para cada caso, o sistema utilizado é submetido às situações operativas e de curtos-circuitos. Em [9], são apresentadas soluções atualmente utilizadas em LTs com ênfase na aplicação da proteção diferencial avaliada no plano- α com o elemento diferencial modificado.

Um estudo mais aprofundado é realizado em [10], no qual é implementada na MODELS toda a modelagem da proteção diferencial de LTs sem compensação série, utilizando-se da característica modificada do plano- α e de técnicas adicionais para realizar análises transitórias e de sensibilidade paramétrica diante de diferentes conjunturas do sistema. Nas simulações de sensibilidade paramétrica, além do tipo de curto-circuito aplicado, foram variados os parâmetros de localização da falta, carregamento, força das fontes (SIR, do inglês *System-to-line Impedance Ratio*) e resistência de falta.

Em [11], evidencia-se detalhadamente a influência do efeito capacitivo de LTs longas e de cabos de extra-alta tensão no desempenho da função de proteção diferencial. Em [12], é retratado um estudo de caso em que o grau de compensação série é aumentado em duas LTs existentes de 230 kV para se transmitir mais potência. Consequentemente, surgem os problemas de inversão de tensão e corrente que são solucionados utilizando-se a memória de tensão e realizando-se pequenos ajustes na característica de restrição modificada do plano- α .

Neste artigo, são apresentadas análises transitórias e de sensibilidade paramétrica de LTs com compensação série. Para tanto, o software ATP foi utilizado para simular curtos-circuitos em uma LT de 500 kV e 400 km com compensação

Olaia P. Diniz é aluna de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB). (e-mail: olaiadiniz@gmail.com)

Kleber M. Silva é professor adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB), 70910-900, Brasília, Brasil (e-mail: klebermelo@unb.br).

série de 40%. Tais análises avaliam a função de proteção diferencial no plano- α utilizando-se a característica de restrição modificada proposta em [5].

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A função de proteção diferencial baseia-se na Lei de Kirchhoff dos nós, isto é, em condições normais de operação do sistema, a soma das correntes que entram e que saem do elemento protegido é idealmente igual a zero. Por outro lado, na ocorrência de um curto-circuito, esta soma apresenta valores não nulos, e caso essa magnitude seja maior que um valor limítrofe, denominado de corrente de *pickup*, os relés detectam o defeito e enviam o comando de *trip* aos disjuntores de forma a extinguir o curto-circuito [2]. Entretanto, existem diferentes situações que podem fazer com que esse comportamento não seja observado. Em particular, no caso de LTs com compensação série, situações como a de inversão de corrente, embora raras, podem fazer com que haja a recusa da atuação da proteção, de modo que o curto-circuito não é extinto, o que compromete a confiabilidade do sistema [1].

A. Plano Alfa

No plano- α , a atuação ou restrição da função diferencial depende da trajetória realizada pelos quocientes entre as correntes de ambos os terminais da LT protegida. Esta razão entre correntes é apresentada no plano- α complexo em que o eixo das abscissas e ordenadas correspondem, respectivamente, às suas partes real e imaginária. O plano- α é definido por (1) e (2), o qual é ilustrado na Fig. 1(a):

$$\frac{\bar{I}_{REM}}{\bar{I}_{LOC}} = a + jb = r = |r|e^{j\theta} \quad (1)$$

$$|r| = \frac{|\bar{I}_{REM}|}{|\bar{I}_{LOC}|} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \theta = \arctan \frac{b}{a} \quad (2)$$

sendo $\bar{I}_{LOC}$ e $\bar{I}_{REM}$, respectivamente, as correntes medidas nos terminais local e remoto.

O plano de representação que retrata o inverso do quociente do plano- α , é chamado de plano beta (plano- β) e apresenta resultados equivalentes ao plano- α , porém, por outra perspectiva. O quociente do plano- β divide a corrente medida no terminal local pela corrente medida no terminal remoto [10].

A construção da característica de restrição modificada do plano- α foi inicialmente proposta em [13]. Esta característica

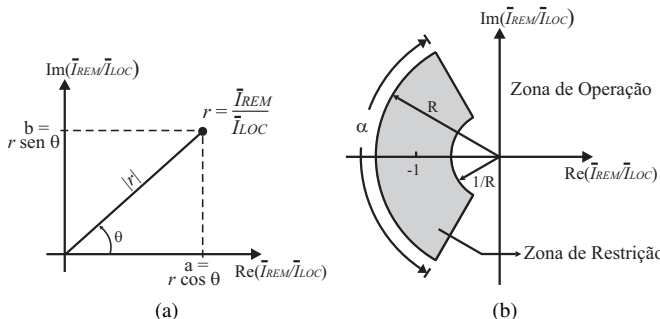


Figura 1. Representação (a) do plano- α complexo, (b) da característica de restrição modificada do plano- α .

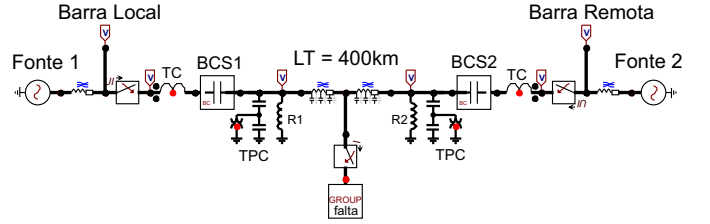


Figura 2. Modelo do sistema elétrico com compensação série.

é delimitada pela região de restrição entre duas retas que saem da origem e vão em direção ao segundo e terceiro quadrantes do plano- α defasadas entre si de um ângulo α que se interceptam com duas circunferências de raios R e $1/R$ conforme ilustrado na Fig. 1(b).

Recentemente, a utilização do plano- α tem se tornado mais atraente para uso na proteção diferencial de LTs, por proporcionar a construção de características de restrição que melhor se adaptam às particularidades de linhas de transmissão, tais como: desalinhamento de amostras, condições de *outfeed*, corrente capacitiva da LT, saturação de TCs, dentre outras [7].

III. SISTEMA TESTE E PARÂMETROS ADOTADOS

O modelo do sistema elétrico de potência empregado neste trabalho está ilustrado na Fig. 2, o qual foi utilizado nas simulações do *software* ATP. Os dados resultantes foram exportados pelo ambiente MODELS a uma taxa de amostragem de 16 amostras por ciclo, os quais foram analisados no *software* MATLAB, no qual os elementos diferenciais 87L, 87LQ e 87LG foram implementados.

A LT de 500 kV de tensão nominal com 40 % de compensação série e extensão de 400 km foi implementada como perfeitamente transposta e a parâmetros distribuídos e constantes com a frequência [14]. Os transformadores de potencial capacitivo (TPCs) foram modelados conforme [15], enquanto que os transformadores de corrente (TCs) que delimitam a zona de proteção da LT são do tipo C800 e possuem relação de transformação de 1200-5 A [16].

Os equivalentes das barras local e remota foram definidos a partir da razão entre as impedâncias de cada fonte pela impedância da LT (SIR). No caso, para todas as simulações apresentadas, o valor de sequência positiva do SIR das duas fontes foi definido para 0,06, o que caracteriza ambas as fontes como fortes. Esses valores de SIR foram calculados considerando, respectivamente, a capacidade de curto-circuito para faltas trifásicas e monofásicas de $I_{RMS,3\phi} = 30$ kA e $I_{RMS,1\phi} = 25$ kA.

Além disso, em ambas as extremidades da LT, foram acrescentados reatores em derivação, cuja principal função é realizar o controle da tensão mantendo-a em nível aceitável de operação, de maneira a absorver o excesso de potência reativa capacitiva do sistema de transmissão e reduzir sobretensões durante surtos de manobra [17].

Com o objetivo de limitar o tamanho e o alto custo de uma instalação de compensação série, mecanismos de proteção de alta velocidade de atuação contra sobretensões são acrescentados ao circuito do banco de capacitores. Dentre as configurações construtivas do banco, escolheu-se para este

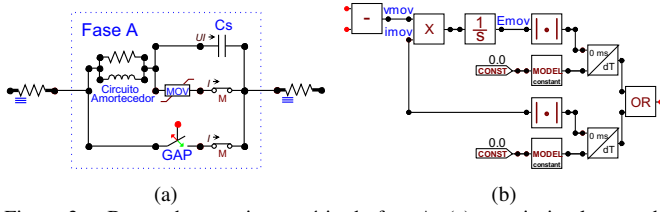


Figura 3. Banco de capacitores série da fase A: (a) arranjo implementado, (b) blocos na MODELS que implementam a lógica de controle do GAP.

trabalho o arranjo da Fig. 3(a). Este arranjo é composto pelo paralelo do conjunto de unidades capacitivas com um varistor de óxido metálico, do inglês *Metal Oxide Varistor* - MOV, e com um centelhador auto-induzido, do inglês *Spark GAP*. Ainda, em série com o paralelo do capacitor com o MOV, é acrescentado um circuito RL amortecedor. Usualmente, além desses dispositivos, tem-se um disjuntor de *bypass* que fecha com o comando disparado pelo GAP, desviando, assim, a corrente de curto-circuito das unidades capacitivas do banco [1]. No caso deste trabalho, o GAP é o responsável por desviar tal corrente.

Na Fig. 3(b), são ilustrados os blocos que implementam as lógicas de controle de disparo do GAP incorporados ao ambiente MODELS, os quais baseiam-se nos valores de corrente e energia acumuladas no MOV. Esses valores acumulados são definidos ao se aplicar curtos-circuitos trifásicos francos em cada uma das barras da LT e ao se obter os maiores valores medidos desses parâmetros, ainda, acrescidos em 5 a 10% como margem de segurança para o disparo do GAP. As lógicas de disparo dos GAPs não são seletivas o suficiente, de modo que há regiões da LT para as quais um ou os dois GAPs não atuam, inclusive, a depender do tipo de curto-circuito. Consequentemente, torna-se fundamental a correta atuação da função de proteção associada escolhida. Para as Figs. 3(a) e 3(b), ressalta-se que os circuitos ilustrados são referentes à fase A do GAP de uma das extremidades da LT. Entretanto, para as demais fases e para os dois lados da LT, os circuitos são análogos.

IV. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a avaliação do sistema modelado, nas simulações de curtos-circuitos foram consideradas as variações dos seguintes parâmetros: tipo de falta (monofásica, trifásica, bifásica e bifásica para a terra), localização da falta (h) e resistência de falta (R_f). Foram mantidos sempre constantes os parâmetros de tempo de aplicação da falta ($t = 50$ ms), de SIR das fontes local e remota ($SIR_L = SIR_R = 0,06$) e de carregamento (leve) do sistema ($\delta = -5^\circ$), o qual foi definido de acordo com as tensões nas barras local (igual a $1\angle 0^\circ$ pu) e remota (igual a $1\angle \delta^\circ$ pu). Os curtos-circuitos aplicados foram mantidos até o fim de cada simulação, isto é, até $t = 300$ ms.

A. Análises Transitórias

O Caso 1 corresponde a um curto-circuito trifásico franco aplicado na barra remota, e, portanto, externo à LT. Observa-se, pela Fig. 4(a), que as unidades de fase permanecem devidamente restringidas próximas ao ponto $(-1,0)$ do plano- β . Em contrapartida, pela Fig. 4(b), nota-se que a unidade

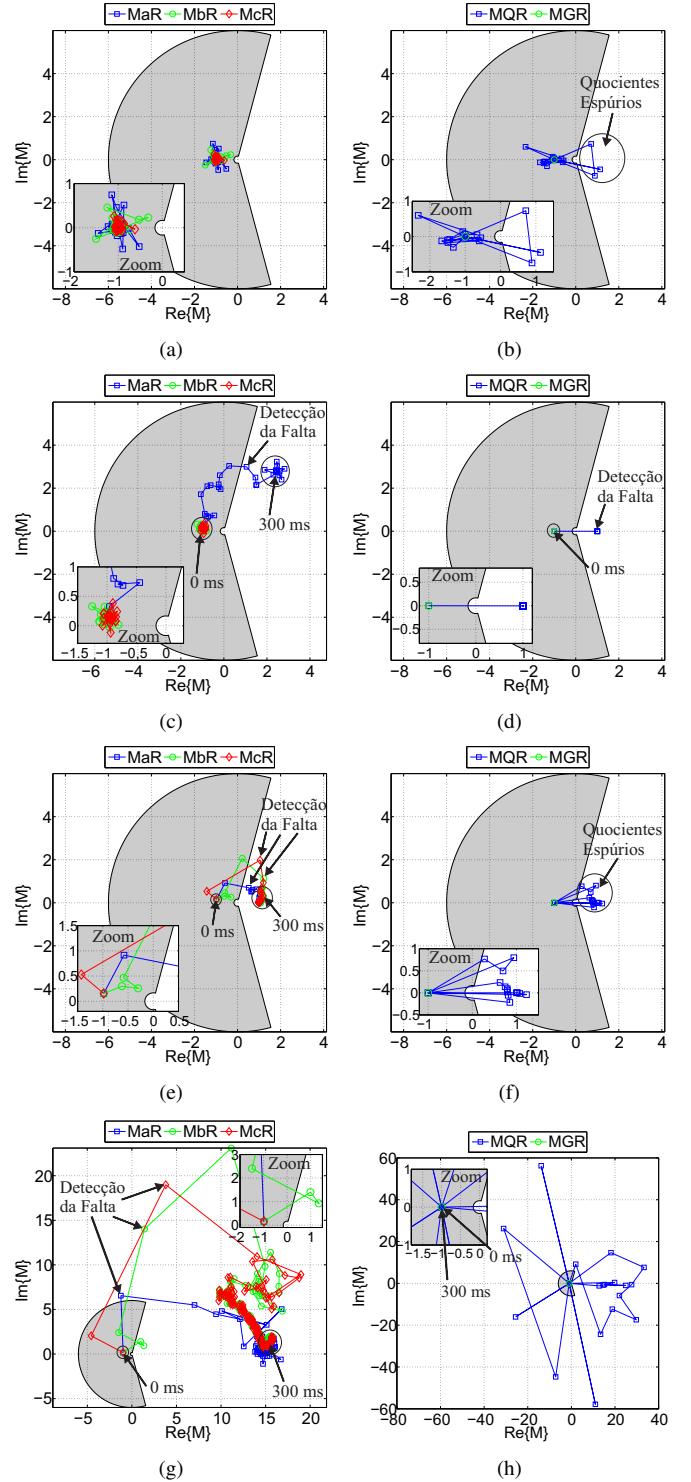


Figura 4. Quocientes do Plano β , Unidades de: (a) Fase, Caso 1; (b) Sequência, Caso 1; (c) Fase, Caso 2; (d) Sequência, Caso 2; (e) Fase, Caso 3; (f) Sequência, Caso 3; (g) Fase, Caso 4; (h) Sequência, Caso 4

de sequência negativa apresenta alguns quocientes espúrios na região de operação, o que não deveria acontecer para um curto-circuito externo, e muito menos, trifásico equilibrado. Isso é facilmente contornado ao se implementar um algoritmo em que o *trip* aos disjuntores só é enviado após um número determinado de amostras consecutivas de curto-circuito. Ainda na Fig. 4(b), verifica-se a correta restrição da unidade de

sequência zero durante toda a simulação.

Os Casos 2 e 3 representam curtos-circuitos internos aplicados na metade da LT. No Caso 2 (Figs. 4(c) e 4(d)), foi simulado um curto-circuito monofásico na fase A com resistência de falta de 250 Ω , enquanto que no Caso 3 (Figs. 4(e) e 4(f)) aplicou-se um curto-circuito trifásico com resistência de falta de 50 Ω . Ressalta-se que para o Caso 2 não houve atuação dos GAPs em ambos os terminais da LT, enquanto que no Caso 3 os GAPs de ambos atuaram. Isso explica o porquê da trajetória do elemento da fase A ser mais instável no Caso 2 (vide Fig. 4(c)), já que, como o capacitor série continua inserido no circuito, surgem frequências subsíncronas que afetam a estimação dos fasores e, por consequência, no valor dos quocientes do plano- α .

Além disto, ressalta-se que, muito embora o Caso 3 corresponda a um curto-circuito trifásico, o elemento de sequência negativa apresenta um comportamento oscilatório que faz com que vários pontos recaem sobre a região de operação no plano- α (vide Fig. 4(f)). Isso ocorre devido ao surgimento de uma componente de sequência negativa espúria durante a fase de transição da estimação do fasor e devido ao efeito da componente DC de decaimento exponencial.

Por fim, para o Caso 4 aplicou-se um curto-circuito trifásico franco imediatamente após o banco de capacitores do terminal local. Pela Fig. 4(g), nota-se que antes dos quocientes se estabilizarem na região de operação, tem-se duas amostras de atuação seguidas de uma de restrição. Tais amostras representam os transitórios das correntes medidas. Para o terminal local, logo após a aplicação do curto-circuito, transitoriamente a unidade da fase B do relé oscila entre a atuação e restrição da falta. Este comportamento é devido à inversão no sentido da corrente medida na fase B, a qual, antes de entrar em regime permanente, hora indica que entra na LT e hora, que sai. Essa oscilação não acontece para o terminal remoto, que, após a aplicação do curto-circuito, já indica que as correntes das três fases, que antes saíam da LT, agora entram em direção ao defeito. Finalmente, na Fig. 4(h), a unidade de sequência zero corretamente não atua, entretanto, a unidade de sequência negativa, em vários instantes apresenta atuação indevida.

B. Análises de Sensibilidade Paramétrica (ASP)

As ASP utilizam-se dos valores em regime permanente de falta para o cálculo dos quocientes. Isto é, em uma ASP, são gerados de maneira automatizada vários casos nos quais, para cada um, o parâmetro de interesse recebe um novo valor. Logo, mede-se as correntes de curto-circuito em regime permanente de falta de ambas as barras e calcula-se o quociente do plano- α . Para um conjunto de casos simulados em massa, foi considerada a variação de apenas um dos parâmetros por vez, enquanto os demais foram mantidos constantes. A Tab. I resume os casos de ASP avaliados.

Nos Casos ASP-1, ASP-2, ASP-3 e ASP-4, varia-se a localização da falta para diferentes tipos de curtos-circuitos aplicados internamente à LT.

Para o Caso ASP-1, observa-se da Fig. 5(a) que, para toda a extensão da LT, há a atuação da unidade da fase A, MaL, bem como a restrição das demais unidades de fase, MbL e McL.

Tabela I
CASOS SIMULADOS PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA.

Caso	Tipo de Falta	h (%)	R_f (Ω)	SIR_L	SIR_R	δ
ASP-1	AT	h^*	0,0	0,06	0,06	-5°
ASP-2	ABC	h^*	0,0	0,06	0,06	-5°
ASP-3	ABC	h^*	50,0	0,06	0,06	-5°
ASP-4	BCT	h^*	0,0	0,06	0,06	-5°
ASP-5	AT	50	R_f^*	0,06	0,06	-5°
ASP-6	AT	5	R_f^*	0,06	0,06	-5°
ASP-7	ABC	50	R_f^*	0,06	0,06	-5°
ASP-8	ABC	5	R_f^*	0,06	0,06	-5°

Legenda:

h^* representa 5%, 8%, ..., 92% e 95% da localização na linha a partir do terminal local;

R_f^* representa 0, 10, 20, ..., 990 e 1000 Ω para curtos-circuitos monofásicos e 0, 10, 20, ..., 490 e 500 Ω para trifásicos.

Acrescenta-se, que a restrição ocorre ao redor do ponto (-1,0), mas não exatamente no ponto, devido ao efeito capacitivo da LT. Por outro lado, a Fig. 5(b) apresenta o comportamento das unidades de sequência. Observa-se a atuação da unidade de sequência negativa, MQL, em toda a LT, no entanto, nota-se que a unidade de sequência zero, MGL, sensibiliza o relé somente até 23% com referência ao terminal local da LT.

A partir das Figs. 5(a) e 5(b) ressalta-se o comportamento não contínuo dos quocientes durante a variação da localização do defeito. Isto é, observam-se dois desvios nos valores calculados desses quocientes devido à atuação do GAP presente no circuito de proteção dos bancos de capacitores da LT.

No Caso ASP-2, para o curto-circuito trifásico franco aplicado, o relé atua devidamente em todo o comprimento da LT tanto para as unidades de fase quanto para as de sequência. Na Fig. 5(c), observa-se a atuação das três unidades de fase, e na Fig. 5(d), a correta restrição das unidades de sequência, em razão do defeito ser equilibrado e não envolver a terra.

Para o Caso ASP-3, aplica-se o curto-circuito trifásico com resistência de falta de 50 Ω . Diferentemente do Caso ASP-2, devido à inserção da resistência de falta, retratam-se os mesmos desvios nos cálculos dos quocientes similarmente ao curto-circuito monofásico. Isto indica que ocorreu a atuação do GAP e *bypass* dos bancos de capacitores, ocasionando o aumento da impedância total da LT tornando-a praticamente puramente indutiva. Em resumo, durante toda a variação do parâmetro h , o relé sensibiliza devidamente as três unidades de fase, conforme a Fig. 5(e), e restringe as unidades de sequência, de acordo com a Fig. 5(f).

Por fim, para o curto-circuito franco bifásico-terra do Caso ASP-4, observa-se que as unidades de fase do relé atuam em todo o comprimento da LT, conforme ilustrado na Fig. 5(g). Em contrapartida, pela Fig. 5(h), nota-se que não houve a atuação da unidade de sequência zero independentemente da localização do defeito. Tal unidade MGL deveria ter sido sensibilizada visto que o curto-circuito BCT envolve a terra. Por outro lado, a unidade de sequência negativa atua corretamente qualquer que seja a localização do defeito interno à LT.

Nos Casos ASP-5, ASP-6, ASP-7 e ASP-8, varia-se a resistência de falta nas ASP para diferentes tipos de curtos-

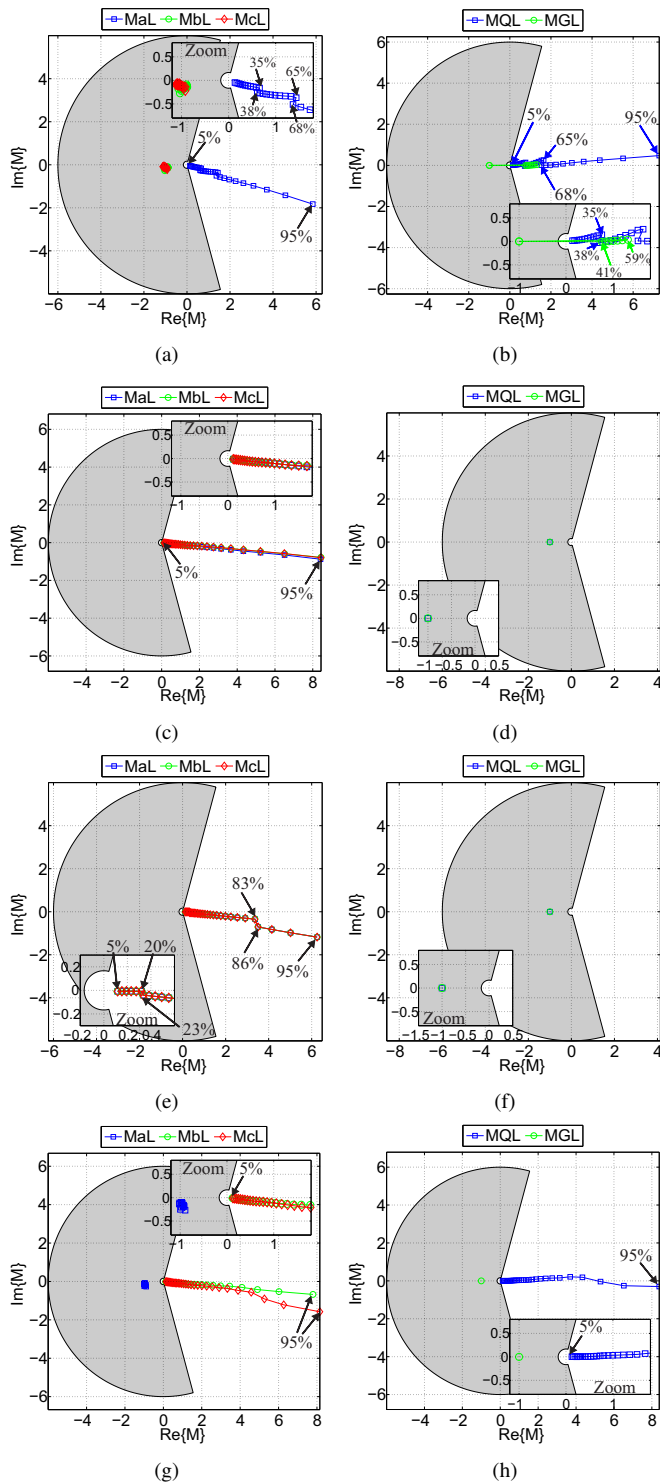


Figura 5. Variação da Localização de Falta - Quocientes do Plano α , Unidades de: (a) Fase, Caso 1; (b) Sequência, Caso 1; (c) Fase, Caso 2; (d) Sequência, Caso 2; (e) Fase, Caso 3; (f) Sequência, Caso 3; (g) Fase, Caso 4; (h) Sequência, Caso 4.

circuitos aplicados internamente à LT. Para estas simulações, o plano- β é ilustrado por apresentar trajetórias mais ilustrativas do que as do plano- α .

Para os Casos ASP-5 e ASP-6, aplicou-se o curto-circuito monofásico na fase A. Quando o defeito é aplicado na metade da LT, observa-se, da Fig. 6(a), que a trajetória dos quocientes

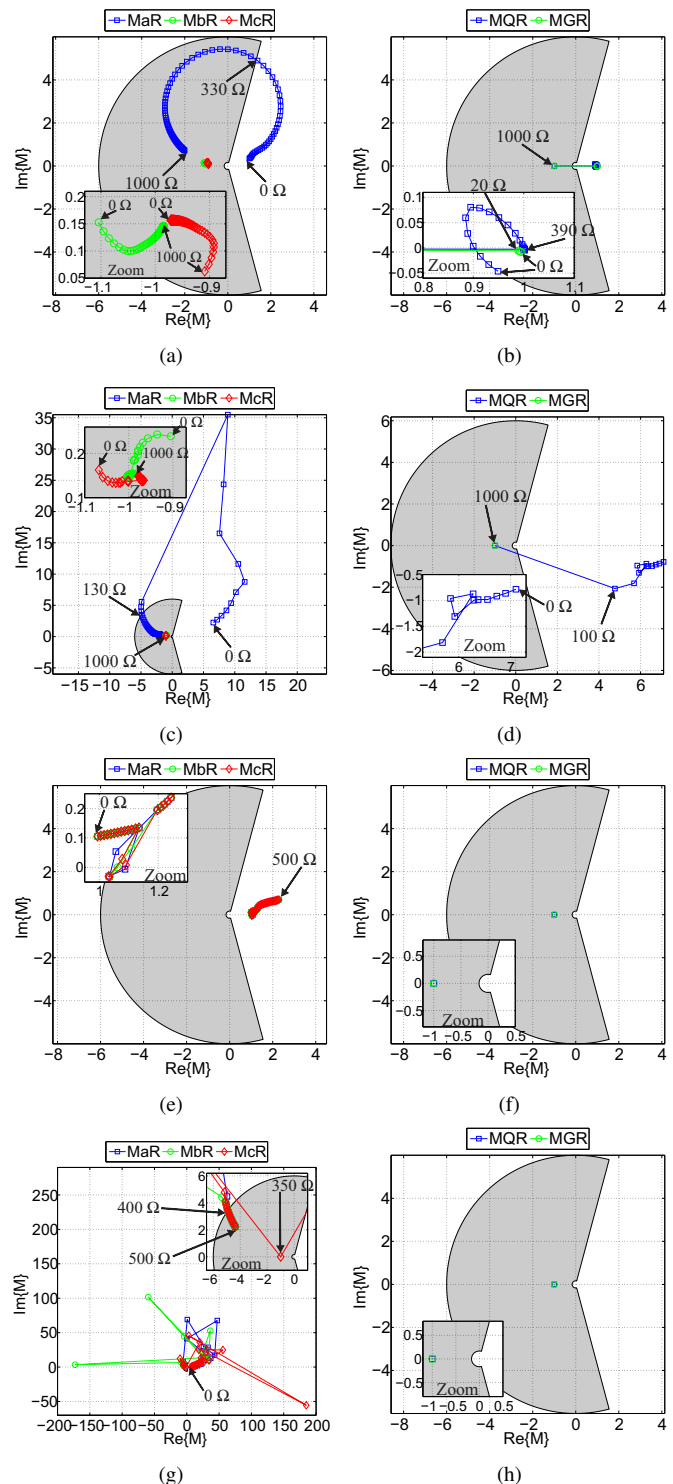


Figura 6. Variação da Resistência de Falta - Quocientes do Plano β , Unidades de: (a) Fase, Caso 5; (b) Sequência, Caso 5; (c) Fase, Caso 6; (d) Sequência, Caso 6; (e) Fase, Caso 7; (f) Sequência, Caso 7; (g) Fase, Caso 8; (h) Sequência, Caso 8.

da unidade da fase A apresenta formato circular. Além disso, para valores pequenos de resistências de falta, os quocientes recaem na região de operação, e, conforme esta resistência aumenta, a trajetória vai em direção à característica de restrição, tendo como limite de atuação, a resistência de 330Ω .

Por outro lado, na situação em que a falta é aplicada em 5%

da LT a partir do terminal local, conforme a Fig. 6(c), a trajetória dos quocientes torna-se ligeiramente instável perdendo seu comportamento circular, porém seguindo a mesma direção de região de operação para a região de restrição. O limite de atuação em relação ao caso anterior, decai para a resistência de falta de 130 Ω . Em relação aos quocientes das fases sãs nos Casos ASP-5 e ASP-6, a restrição não ocorre exatamente no ponto ótimo de (-1,0), sendo pior para o Caso ASP-6. Tal instabilidade ocorre devido ao fato de que não houve atuação dos GAPs para essas fases, de modo que o capacitor série continua inserido no circuito, o que ocasiona o surgimento de frequências subsíncronas que afetam as trajetórias no plano- α .

Para as unidades de sequência do Caso ASP-5, na Fig. 6(b), verifica-se que a unidade de sequência zero é sensibilizada somente para curtos-circuitos com resistência de até 20 Ω , restringindo no ponto (-1,0) do plano β após esse valor. A unidade de sequência negativa apresenta uma melhor condição de atuação identificando o curto-circuito para resistências de falta de até 390 Ω . Para valores maiores, a unidade de sequência negativa também restringe no ponto (-1,0). No Caso ASP-6, em relação às unidades de sequência da Fig. 6(d), a unidade de sequência zero indevidamente não apresenta atuação independentemente da resistência de falta. Além disso, a unidade de sequência negativa é sensibilizada somente para faltas com resistência de até 100 Ω .

Nos Casos ASP-7 e ASP-8, aplicou-se o curto-circuito trifásico. Da Fig. 6(e), constata-se que para o defeito aplicado na metade da LT, tem-se a correta atuação das três unidades de fase para todo o intervalo aplicado na variação da resistência de falta. Por outro lado, conforme a Fig. 6(g), percebe-se uma instabilidade crítica da trajetória dos quocientes devido à proximidade da falta à barra local. No entanto, apesar de tal instabilidade, as unidades de fase atuam para curtos-circuitos trifásicos com resistência de falta de até 400 Ω . A única exceção neste intervalo, pode ser visualizada na parte ampliada da Fig. 6(g) como o cálculo espúrio do quociente referente à resistência de falta de 350 Ω , o qual recai indevidamente dentro da característica de restrição.

Observa-se das Figs. 6(f) e 6(h) que, as unidades de sequência em ambos os casos restringem exatamente no ponto ótimo (-1,0) do plano- β , visto que o curto-circuito trifásico, além de ser equilibrado, não envolve a terra.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desempenho da proteção diferencial avaliada na característica modificada do plano- α para uma LT longa com compensação série. Foi proposto um sistema teste modelado no *software* ATP, o qual foi submetido a curtos-circuitos diversos.

Os resultados obtidos, em sua maioria, apresentaram boas condições de atuação da função 87L, a exceção dos curtos-circuitos próximos aos terminais. Em relação aos elementos 87LQ e 87LG, estes ficaram comprometidos devido à compensação série da LT. Em alguns casos, apresentaram cálculos espúrios dos quocientes, enquanto que em outros, indevidamente atuaram ou deixaram de atuar corretamente.

Apesar da proteção não ter atuado corretamente para todos os casos simulados, uma alternativa consiste na utilização de

um esquema de proteção mais robusto no qual são necessárias amostras consecutivas de curto-circuito, para que seja identificada a atuação e, então, enviado o sinal de *trip* aos disjuntores de forma a isolar o defeito.

Dentre os casos implementados, foram simuladas algumas situações pontuais e casos de simulações em massa para a avaliação da sensibilidade paramétrica em função da variação da localização da falta e da resistência de curto-circuito aplicada.

Finalmente, ressalta-se a contribuição à literatura e relevância dos resultados obtidos em razão de não se ter muitos trabalhos nos quais sejam abordados avaliações da proteção diferencial para LTs com compensação série. Tampouco, utilizando-se a característica modificada do plano- α .

REFERÊNCIAS

- [1] P. M. Anderson and R. G. Farmer, *Series Compensation of Power Systems*. Encinitas, California, EUA: PBLSH! Inc., 1996.
- [2] S. H. Horowitz and A. G. Phadke, *Power System Relaying*, 3rd ed. West Sussex, England: John Wiley & Sons Inc, 2008.
- [3] G. Ziegler, *Numerical Differential Protection: Principles and Applications*, 2nd ed. Berlin, Germany: Siemens, 2012.
- [4] H. J. A. Ferrer and I. Edmund O. Schweitzer, "Modern solutions for protection, control and monitorin of electronic power system," Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, Tech. Rep., 2010.
- [5] D. Tziouvaras, H. Altuve, G. Benmouyal, and J. Roberts, "Line differential protection with an enhanced characteristic," Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, Tech. Rep., 2004.
- [6] G. Benmouyal and J. B. Mooney, "Advanced sequence elements for line current differential protection," Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, Tech. Rep., 2006.
- [7] E. C. Molas, K. M. Silva, and B. F. Küsel, "Teoria de comparadores aplicada na avaliação da atuação da proteção diferencial de linhas de transmissão no plano alfa." Campina Grande, PB: Congresso Brasileiro de Automática (CBA), set. 2012.
- [8] E. C. Molas, L. P. Morais, and K. M. Silva, "Análise das trajetórias no plano alfa referentes à operação da proteção diferencial de linhas de transmissão." Brasília, DF: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XXII SNTPEE), out. 2013.
- [9] H. Miller, J. Burger, N. Fischer, and B. Kasztenny, "Modern line current differential protection solutions." Texas, USA: Texas A&M Conference for Protective Relay Engineers, 2010.
- [10] E. C. Molas, "Proteção diferencial de linhas de transmissão no plano alfa: Modelagem e simulação," Master's thesis, Universidade de Brasília, dec. 2014.
- [11] Y. Xue, D. Finney, and B. Le, "Charging current in long lines and highvoltage cables protection application considerations," Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, Tech. Rep., 2012.
- [12] E. Bakie, C. Westhoff, N. Fischer, and J. Bell, "Voltage and current inversion challenges when protecting series-compensated lines - a case study." Spokane, Washington, EUA: 42nd Annual Western Protective Relay Conference, out. 2015.
- [13] D. Tziouvaras, H. Altuve, G. Benmouyal, and J. Roberts, "The effect of multiprinciple line protection on dependability and security," Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, Tech. Rep., 2001.
- [14] *ATP - Alternative Transient Program*, Leuven EMTP Center, Herverlee, Belgium, 1987.
- [15] 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.
- [16] *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*, IEEE Power System Relaying Committee, 2004. [Online]. Available: <http://www.pes-psrc.org>
- [17] S. de Oliveira Frontin, *Equipamentos de Alta Tensão - Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas*. Brasília, DF, Brasil: Goya Editora LTDA, 2013.