

Análise de Sensibilidade Paramétrica da Proteção Diferencial de Transformadores de Potência

Larissa M. Peres e Kleber M. Silva

Resumo—Neste artigo, apresenta-se uma metodologia de análise do desempenho da proteção diferencial de transformadores de potência. Para tanto, foi desenvolvido um algoritmo numérico que representa um relé microprocessado, que implementa as funções de proteção diferencial de fase (87T), de sequência negativa (87Q) e de falta à terra restrita (REF). A avaliação das funções de proteção foi realizada por meio da análise de sensibilidade paramétrica (ASP). Os resultados mostram o desempenho das funções de proteção perante situações às quais o transformador está sujeito (energização, curtos-circuitos, condição de carregamento e força da fonte). A utilização das ASPs permitem realizar análises mais aprofundadas do que as pontuais normalmente realizadas, bem como entender e verificar se os ajustes das funções de proteção foram escolhidos de forma apropriada.

Palavras-chave—Carregamento, força da fonte, proteção diferencial, sensibilidade paramétrica, transformador de potência.

I. INTRODUÇÃO

A transmissão e distribuição de energia elétrica até o consumidor final abrange uma grande variedade de equipamentos. Dentre estes diversos equipamentos que compõem um sistema elétrico de potência, o transformador de potência é um dos mais importantes, por ele ser o responsável pela operação do sistema com a tensão mais conveniente dos pontos de vista técnico e econômico. Desta forma, a aplicação de dispositivos de proteção para transformadores de potência é de suma importância para garantir a estabilidade e qualidade da energia entregue aos consumidores.

Dos tipos de falhas que podem ocorrer em sistemas elétricos, de acordo com [1], cerca de 10% ocorrem em transformadores, sendo que, 70% destas falhas acontecem nos seus enrolamentos e comutadores de taps. Esta situação justifica a razão pela qual fabricantes e pesquisadores estão buscando por sistemas de proteção mais rápidos e confiáveis.

Os primeiros relés desenvolvidos tinham a função de sobre-corrente como proteção unitária de transformadores de potência. Contudo, com o aumento da complexidade do sistema e com o desenvolvimento da tecnologia digital, a função diferencial passou a ser usada em grandes transformadores, com potência nominal tipicamente superior a 10 MVA [2].

Na proteção diferencial de transformadores de potência alguns aspectos críticos devem ser avaliados, como as condições de energização e faltas internas no equipamento. No estado da arte da modelagem de transformadores para faltas internas, em [3] os autores realizam simulações de falta entre espiras em 2% do enrolamento do transformador, em que o elemento

diferencial de sequência negativa detecta a falta e a elimina. Em caso de falta entre espira e a terra, apenas o elemento de proteção de falta à terra restrita detecta a falta interna, eliminando-a. A energização de transformadores é estudada em [4] e [5]. Em [4], faz-se uso de uma análise de métodos de proteção que utilizam as informações sobre as harmônicas de segunda ordem nas correntes de *inrush*. Já em [5], apresenta-se uma combinação das técnicas de bloqueio e de restrição por harmônicos.

No presente trabalho, são investigadas as funções de proteção diferencial para o transformador de potência, a saber: de fase (87T), de sequência negativa (87Q) e de falta à terra restrita (REF). A avaliação destas funções será desenvolvida por meio de análises de sensibilidade paramétrica (ASPs), considerando as simulações de energização e de curtos-circuitos internos ao transformador de forma análoga as realizadas em [6]. Além disto, como contribuição deste trabalho, será analisado o comportamento das funções de proteção do transformador quando varia-se o ângulo de carregamento e a força das fontes do sistema.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES

A. Proteção diferencial percentual de fase (87T)

A função de proteção diferencial é a mais recomendada para proteger transformadores de potência de grande porte [7]. Normalmente, emprega-se a proteção diferencial percentual para a implementação do elemento de fase (87T), no qual compara-se uma corrente de operação (I_{op}) com uma corrente de restrição (I_{res}). As equações (1) a (2) regem a filosofia deste tipo de proteção. De acordo com [8], I_{res} pode ser calculada de diversas formas, sendo a equação (2) a mais comumente utilizada, tendo sido por isso adotada neste trabalho.

$$I_{op} = |\hat{I}_H + \hat{I}_X| \quad (1)$$

$$I_{res} = k \cdot (|\hat{I}_H| + |\hat{I}_X|) \quad (2)$$

sendo que, k é o fator de compensação, geralmente igual a 0,5 ou 1 [8]; $\hat{I}_H$ e $\hat{I}_X$ são, respectivamente, os fasores das correntes do lado de alta e baixa tensão do transformador.

A função diferencial percentual gera o sinal de disparo ou *trip* quando as duas condições abaixo são satisfeitas [7].

$$I_{op} > I_{pickup} \quad e \quad I_{op} > SLP \cdot I_{res} \quad (3)$$

sendo que, I_{pickup} é a corrente mínima de atuação; e SLP (do inglês, *slope*) indica a inclinação da curva de operação.

Os principais fatores que podem causar falsas correntes diferenciais na aplicação da proteção diferencial a transformadores de potência são: defasagem angular entre as correntes

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido da CAPES.

Larissa M. Peres, é aluna de doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade de Brasília (UNB). Email: larissamp@aluno.unb.br.

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

dos enrolamentos, diferenças nas relações de transformação dos transformadores de corrente (TCs) e do transformador, correntes de *inrush*, sobreexcitação e corrente de sequência zero. Estes fatores devem ser corrigidos para evitar a atuação indevida do relé de proteção, mesmo sem a ocorrência de nenhum tipo de defeito.

1) *Correção da Defasagem Angular*: Neste trabalho o transformador está conectado em estrela-aterrado/delta, com as correntes dos enrolamentos defasadas de 30° entre si. Se não houver uma compensação desta defasagem, o relé entenderá como uma condição de falta e irá operar indevidamente. Sendo assim, essa defasagem será compensada internamente via software, por meio da matriz de compensação M_θ , sendo compensada pelo lado de baixa tensão do transformador, conforme apresentada na equação (4).

$$[M_{\theta=30^\circ}] = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2) *Relação de Transformação - Ajuste do TAP*: No caso de relés numéricos microprocessados, é possível compensar totalmente a diferença entre as correntes por meio de um TAP normalizado, equação (5), que é aplicado em ambos os lados do transformador [7].

$$TAP = \frac{1000 \cdot S_{nom} \cdot C_n}{\sqrt{3} \cdot V_{nom} \cdot RTC} \quad (5)$$

sendo que, S_{nom} é a potência nominal do transformador (MVA); C_n é um fator de correção que depende da ligação dos TCs ($C_n = 1$ conectados em estrela e $C_n = \sqrt{3}$ conectados em delta); V_{nom} é a tensão nominal do transformador (kV); RTC é a relação de transformação do TC.

3) *Compensação da sequência zero*: Considerando que neste trabalho o transformador está conectado em estrela-aterrado/delta, as correntes de sequência positiva e negativa fluem do primário para o secundário, já as correntes de sequência zero ficam circulando no enrolamento delta.

Sendo assim, as correntes medidas pelos TCs do lado delta não contem componente de sequência zero, possibilitando a atuação indevida da unidade 87T. Desta forma, essa componente deve ser subtraída das correntes medidas pelos TCs do lado conectado em estrela [7]. Essa compensação é realizada pela aplicação da matriz M como apresentada na equação (6).

$$[M] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

4) *Restrição por harmônicas*: A corrente de *inrush* do transformador possui forte presença da segunda harmônica, e a corrente em decorrência da sobreexcitação forte conteúdo de quinta harmônica [8]. Para efetuar a restrição por harmônicas, a corrente de restrição é reforçada por um percentual de correntes harmônicas presentes no sinal, denominada neste trabalho de corrente compensada (I_{comp}), conforme apresentada na equação (7). Assim, a unidade 87T ainda continua habilitada para atuar [8], obedecendo as condições de operação mostradas nas equações abaixo.

$$I_{comp} = I_{res} + \frac{1}{SLP} \cdot \left(\frac{1}{k_2} \cdot I_{2h} + \frac{1}{k_5} \cdot I_{5h} \right) \quad (7)$$

$$I_{op} > I_{pickup} \quad e \quad I_{op} > SLP \cdot I_{comp} \quad (8)$$

sendo que, I_{2h} e I_{5h} são os módulos das componentes de segunda e quinta harmônicas; k_2 e k_5 são constantes de proporcionalidade. De acordo com [9], alguns relés restringem sua operação quando a concentração de segunda harmônica ultrapassa 15% em relação à componente fundamental.

B. Proteção diferencial de sequência negativa (87Q)

A função de proteção de sequência negativa apresenta o mesmo princípio de funcionamento das unidades de fase. Portanto, para calcular as correntes de operação (I_{opQ}) e de restrição (I_{resQ}) da função 87Q deve-se extrair as componentes de sequência negativa dos enrolamentos do primário (I_{QH}) e secundário (I_{QX}) do transformador [7]. Essas correntes são apresentadas pelas equações (9). Já as condições de operação são mostradas nas equações (10).

$$I_{opQ} = |\hat{I}_{QH} + \hat{I}_{QX}| \quad e \quad I_{resQ} = \max(|\hat{I}_{QH}|, |\hat{I}_{QX}|) \quad (9)$$

$$I_{opQ} > I_{pickup87Q} \quad e \quad I_{opQ} > SLP \cdot I_{resQ} \quad (10)$$

C. Proteção diferencial de Falta à Terra Restrita (REF)

Durante faltas muito próximas ao neutro do enrolamento aterrado do transformador, as correntes de fase são pequenas enquanto a corrente no neutro é alta, não sendo capazes de sensibilizar a função 87T de cada fase. Para possibilitar a detecção desse tipo de falta é utilizada a proteção de falta à terra restrita, do Inglês *Restricted Earth Fault Protection* (REF), que possui alta sensibilidade para faltas próximas ao neutro, detectando-as de forma rápida [7].

Desta forma, para calcular as correntes de operação (I_{opREF}) e de restrição (I_{resREF}) da função REF deve-se comparar a corrente de neutro (I_N) com a corrente de sequência zero (I_0) medida nos terminais do transformador. Essas correntes são definidas pelas equações (11) e (12). Já as condições de operação são mostradas nas equações (13).

$$I_{opREF} = |\hat{I}_N| \quad (11)$$

$$I_{resREF} = k_R \cdot (|(\hat{I}_N - 3 \cdot \hat{I}_0)| - |(\hat{I}_N + 3 \cdot \hat{I}_0)|) \quad (12)$$

$$I_{opREF} > I_{pickupREF} \quad e \quad I_{opREF} > I_{resREF} \quad (13)$$

sendo k_R um fator de estabilização.

D. Bloqueio por harmônicas

No bloqueio por componentes harmônicas a corrente de operação é comparada com as componentes harmônicas independentemente da corrente de restrição [8]. As lógicas de bloqueio utilizam apenas harmônicas de segunda e quinta ordem, e a atuação do bloqueio é baseada nas condições:

- 1) Se alguma das equações apresentadas em (14) forem satisfeitas, o bloqueio atuará, impedindo o *trip*.
- 2) Já se alguma das equações apresentadas em (15) forem satisfeitas, o bloqueio não atuará, e haverá garantia de *trip*.

$$\frac{|I_{op,2h}|}{|I_{op}|} \geq k_{2b} \quad e \quad \frac{|I_{op,5h}|}{|I_{op}|} \geq k_{5b} \quad (14)$$

$$\frac{|I_{op,2h}|}{|I_{op}|} < k_{2b} \quad e \quad \frac{|I_{op,5h}|}{|I_{op}|} < k_{5b} \quad (15)$$

III. SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADOR

Para avaliar o desempenho da proteção diferencial de transformador, foi realizada a simulação de um sistema elétrico no programa ATP. Na Fig. 1 ilustra-se o sistema simplificado utilizado para as análises realizadas neste trabalho. O transformador possui relação de transformação de 230/69 kV, potência nominal de 50 MVA, conexão YNd1 e está limitado pelos TCs 400-5A (lado estrela-aterrado) e 1000-5A (lado delta). O TC de neutro possui relação 400-5A. Para simulações de curtos internos, é necessário particionar os enrolamentos do transformador em estudo, como foi feito em [6]. As funções de proteção possuem os ajustes descritos na Tabela I.

Com as ASPs é possível verificar se os parâmetros escolhidos para cada função implementada atendem a um número significativo de condições de operação às quais o transformador está sujeito. Desta forma, foram geradas diferentes bases de dados, a saber: energização do transformador ao longo de um ciclo; curtos-circuitos entre espiras e espira-terra, afim de investigar a influência da porcentagem do enrolamento curto-circuitado; curto-circuito espira-terra no enrolamento estrela (10% do neutro), com o intuito de verificar a influência da força das fontes e condições de carregamento do sistema.

A. Energização do Transformador ao longo de um ciclo

A manobra de energização do transformador foi realizada ao longo de um ciclo (360°) pelo lado que está conectado em estrela-aterrado (230 kV), considerando-se a característica não linear do transformador.

Na Fig. 2 são apresentados os comportamentos das funções de proteção implementadas. Analisando a Figura 2(a), nota-se que a corrente compensada (I_{comp}) da função 87T de todas as fases, que considera a parcela relacionada às componentes harmônicas, ficou maior que a corrente de operação em todas as energizações, impedindo a sua atuação. Para a função 87Q, Fig. 2(b), as correntes de restrição e operação se coincidem, para todos os casos simulados, inibindo também a sua atuação. Já no caso da função REF, Fig. 2(c), a corrente de operação

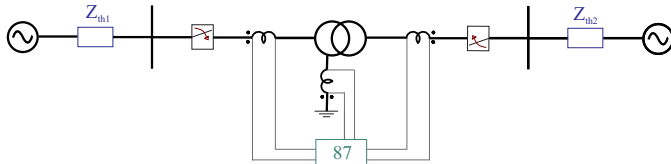


Figura 1. Sistema simulado.

Tabela I
PARAMETRIZAÇÃO DO RELÉ

Parâmetro	87T	87Q	REF
I_{pickup}	1,0 pu	0,1 pu	0,2 pu
SLP	0,5	1,0	1,0
k_R	-	-	2
Parâmetro	Restrição		Bloqueio
k_2	15%		15%
k_5	15%		15%

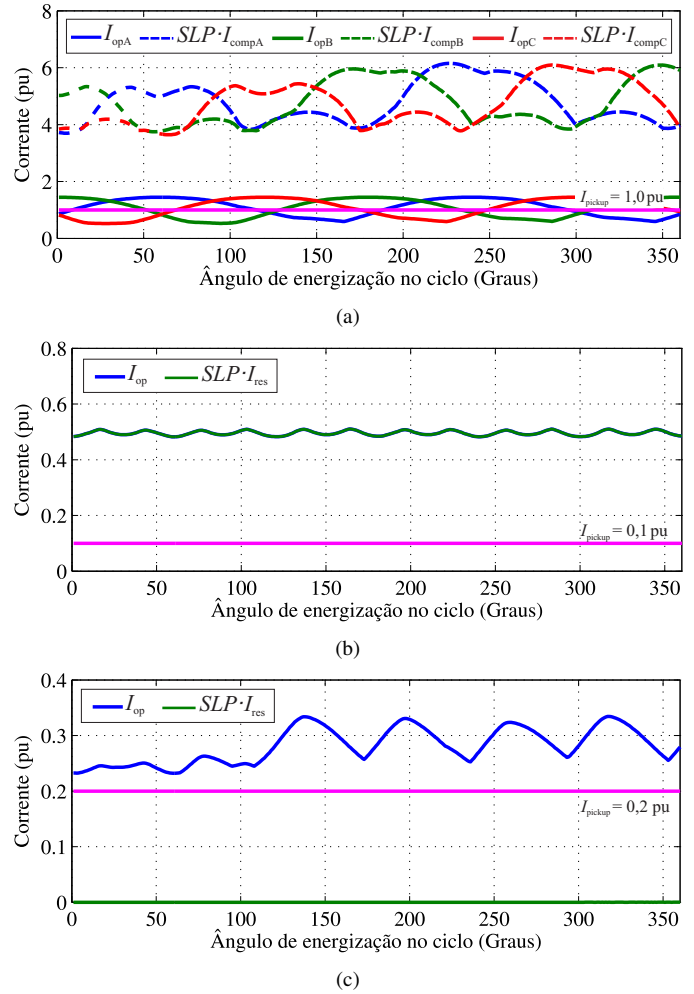


Figura 2. Comportamento das funções de proteção para a energização do transformador ao longo de um ciclo: (a) 87T; (b) 87Q; (c) REF.

é maior que as correntes mínima de pickup e de restrição para todas as energizações realizadas. Esse comportamento é indesejado, pois na energização o relé não deve atuar indevidamente. Portanto, a atuação desta função é inibida com a ativação do bloqueio por harmônicos.

B. Curto-circuito espira-espira ao longo dos enrolamentos estrela e delta

As simulações para os casos de curtos-circuitos espira-espira foram realizadas desde 1% até 98% do enrolamento conectado em estrela na fase A, e do enrolamento conectado em delta entre as fases A e B. Este é um caso crítico para a proteção diferencial, pois curtos entre espiras causam pouca alteração das correntes de fase. Analisando a Fig. 3 são apresentados os comportamentos das funções de proteção implementadas. Verifica-se que a função 87T, Fig. 3(a), não atuaria para curtos-circuitos até cerca de 25% das espiras curto-circuitadas e, a função 87Q, Fig. 3(b), não atuaria para curtos até 5% das espiras. Neste caso, é necessário a utilização das proteções intrínsecas, como o relé de gás (Buchholz) [7]. Já a função REF, Fig. 3(c), não atuaria para curtos-circuitos em qualquer porcentagem do enrolamento.

Na Fig. 4 ilustram-se os comportamentos das funções de proteção perante curtos-circuitos entre espiras ao longo do

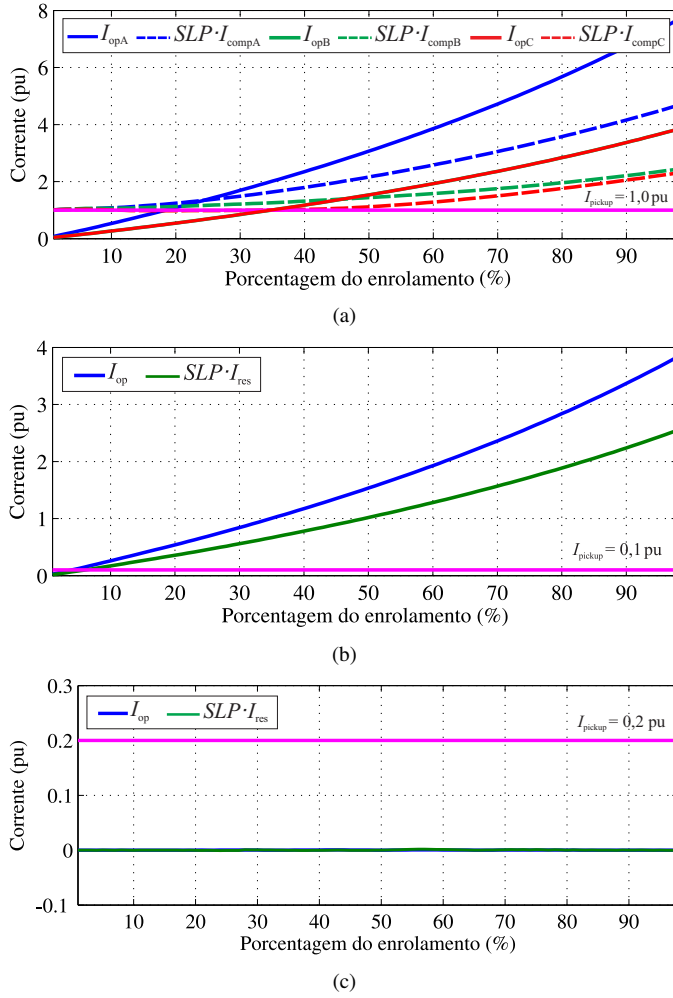


Figura 3. Comportamento das funções de proteção para curtos-circuitos espira-espira ao longo do enrolamento delta: (a) 87T; (b) 87Q; (c) REF.

enrolamento estrela. Da Fig. 4(a), observa-se que a função 87T seria sensibilizada a partir de 2,5% de espiras curto-circuitadas. Ressalta-se que as correntes I_{opB} e I_{opC} estão sobrepostas. No caso da função 87Q, Fig. 4(b), esta seria capaz de detectar curtos-circuitos ao longo de todo o enrolamento. Já a função REF, Fig. 4(c), não atuaria para curtos-circuitos em qualquer porcentagem do enrolamento, uma vez que o desequilíbrio não envolve a terra.

C. Curto-circuito espira-terra ao longo dos enrolamentos estrela e delta

As simulações para os casos de curtos-circuitos espira-terra foram realizadas desde 1% até 98% do enrolamento, contados a partir do fechamento do neutro do transformador para o enrolamento estrela e da fase A em direção à fase B no enrolamento delta.

Na Fig. 5 são apresentados os comportamentos das funções de proteção implementadas. Nota-se pela Fig. 5(a) que a função 87T de cada fase não atuaria para curtos-circuitos entre 19,5% (analisando a fase A) e 73,5% (analisando a fase C) do enrolamento. Por outro lado, a função 87Q, Fig. 5(b), atuaria para todos curtos-circuitos do enrolamento, o que se justifica pelo fato dela apresentar alta sensibilidade para

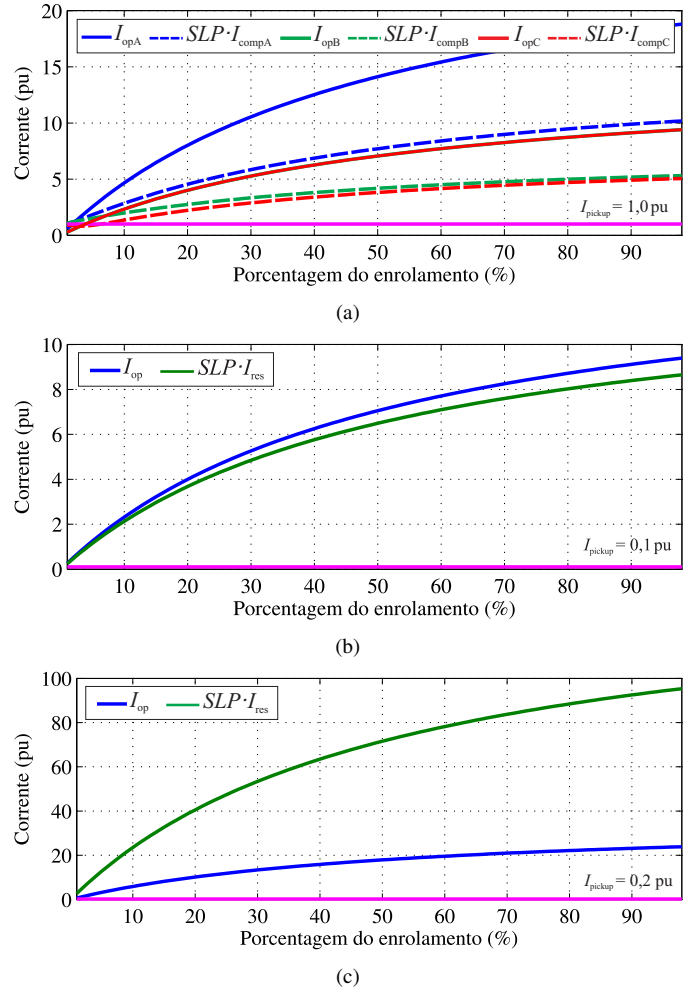


Figura 4. Comportamento das funções de proteção para curtos-circuitos espira-espira ao longo do enrolamento estrela: (a) 87T; (b) 87Q; (c) REF.

curtos-circuitos assimétricos [7]. Já a função REF, Fig. 5(c), não atuaria para curtos-circuitos em qualquer porcentagem do enrolamento. Analisando agora os desempenhos das funções de proteção implementadas na Fig. 6, observa-se que a função 87T de cada fase seria capaz de detectar os curtos-circuitos a partir de 7,5% do enrolamento, enquanto a função 87Q, Fig. 6(b), atuaria para todos os curtos-circuitos do enrolamento. Ressalta-se que as correntes I_{opB} e I_{opC} estão sobrepostas. Já a função REF, Fig. 6(c), atuaria para todos os casos simulados.

D. Variação do ângulo de carregamento do sistema (δ)

Para essa simulação, o sistema é configurado com ambas as fontes fortes ($SIR_H = 0,1$ e $SIR_X = 0,1$). Com o intuito de verificar a influência da variação do carregamento do sistema, aplica-se um curto-circuito espira-terra no enrolamento estrela (10% do neutro), e varia-se o ângulo de carregamento no intervalo $-90^\circ < \delta < 90^\circ$. Ressalta-se que de acordo com a Figura 6(a), a função 87T atua para o curto-circuito analisado com o carregamento igual a -5° . Desta forma, espera-se verificar esta mesma atuação para a variação do carregamento.

Na Fig. 7 são apresentados os comportamentos das funções de proteção implementadas. Nota-se pela Fig. 7(a) que a função 87T de cada fase só atuaria para ângulos de carregamento entre -61° e 4° . Portanto, conforme esperado, a função

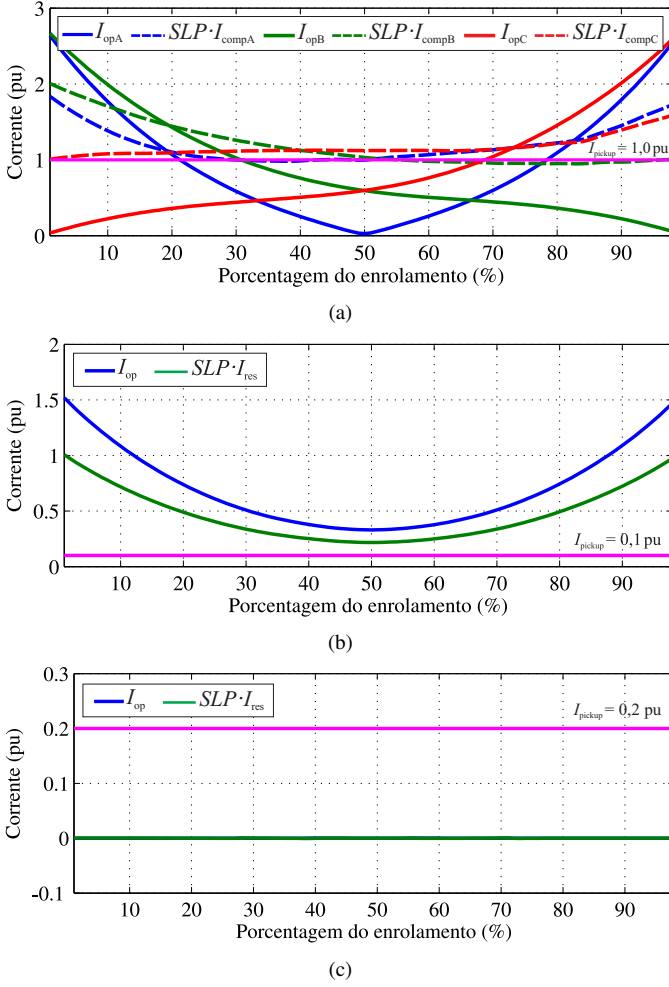


Figura 5. Comportamento das funções de proteção para curtos-circuitos espira-terra ao longo do enrolamento delta: (a) 87T; (b) 87Q; (c) REF.

87T atuou para um carregamento de -5° . Ressalta-se que as correntes I_{opB} e I_{opC} estão sobrepostas. Por outro lado, as funções 87Q e REF, Figs. 7(b) e 7(c), atuariam para todas as variações de carregamento.

As correntes que circulam o transformador para carregamentos abaixo de -61° possuem valores acima de 146% da corrente nominal do transformador, e para carregamentos acima de 4° possuem valores acima de 167% da corrente nominal. De acordo com [10], os transformadores devem suportar sobrecargas correspondentes a 150% da sua corrente nominal. Nesse sentido, verifica-se que o transformador não poderia operar para ângulos de carregamento abaixo de -61° e acima de 4° , dado que os valores de correntes neste intervalo excedem os limites específicos de cargas máximas admissíveis [10]. Assim, esses carregamentos não configuram uma limitação da função 87T, já que na prática eles não seriam atingidos.

E. Variação da força da fonte do lado de alta tensão do transformador

Para este caso analisado, a condição de curto-circuito simulada considera a influência da variação da força das fontes. A força da fonte está vinculada à sua capacidade de contribuição de corrente de curto-circuito, sendo estimada pela razão entre a

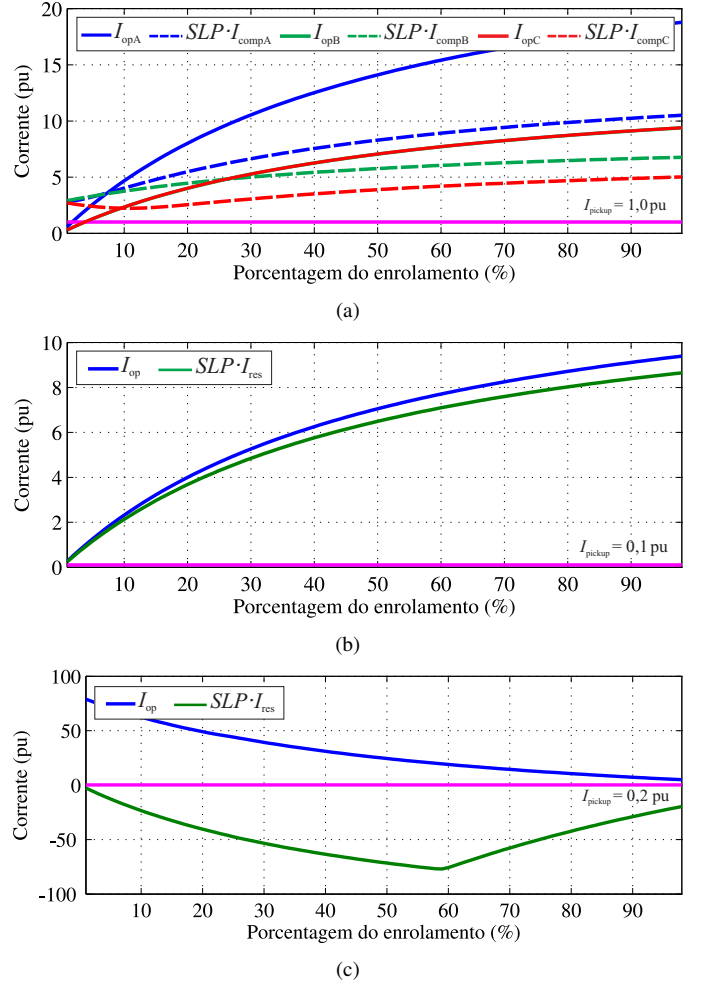


Figura 6. Comportamento das funções de proteção para curtos-circuitos espira-terra ao longo do enrolamento estrela: (a) 87T; (b) 87Q; (c) REF.

impedância equivalente do sistema conectada à fonte analisada e a impedância da linha de transmissão [11]. Esta variável é denominada de *System Impedance Ratio* (SIR). Ressalta-se que neste trabalho a variável SIR representa a razão entre as impedâncias da fonte e do transformador, chamada de SIR_H (lado de alta tensão) e SIR_X (lado de baixa tensão). Sendo assim, quão menor o valor de SIR, maior a contribuição de corrente de curto-circuito da fonte.

Para essa simulação, o sistema é configurado com fonte do lado de alta tensão variável ($SIR_H = 0,1$ a $10,0$) e fonte forte do lado de baixa tensão ($SIR_X = 0, 1$). Então, aplica-se um curto-circuito espira-terra no enrolamento estrela (10% do neutro), considerando-se um carregamento de -5° .

Analisando a Fig. 8(a), observa-se que a função 87T, devido a fase A, seria sensibilizada para qualquer variação da força da fonte. Ressalta-se que as correntes I_{opB} e I_{opC} estão sobrepostas. No caso das funções 87Q e REF, Figs. 8(b) e 8(c), estas também seriam capazes de atuar para todos os casos analisados. Além disso, nota-se que a medida que o valor de SIR aumenta, menor é a contribuição da corrente de curto-circuito, e consequentemente, menor o valor da corrente de operação, podendo ser menor que o valor da corrente de restrição, e inibir a atuação das funções de proteção.

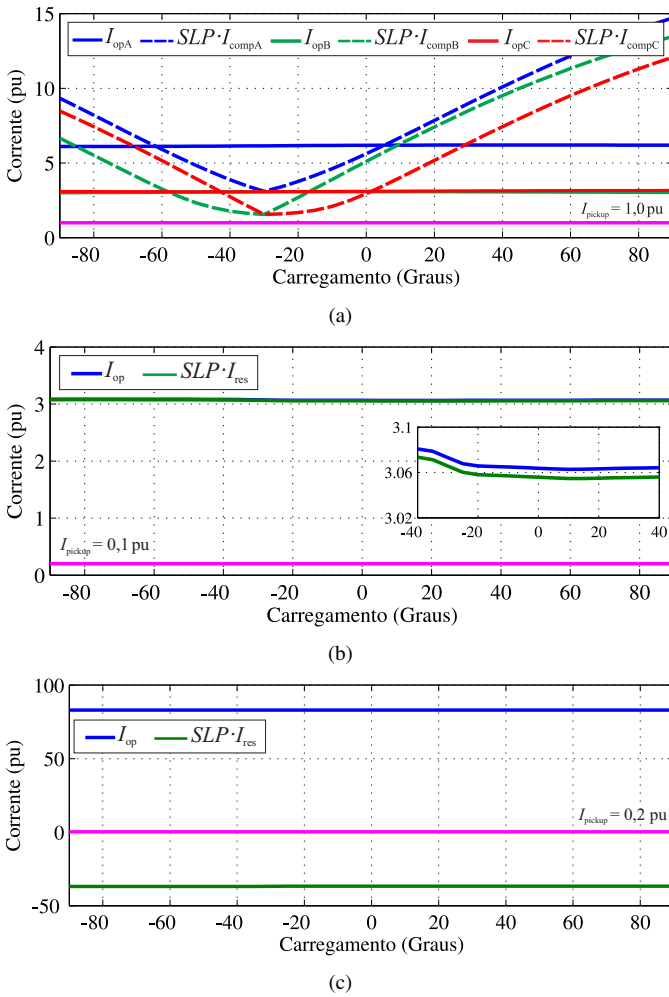


Figura 7. Comportamento das funções de proteção para variação do ângulo de carregamento do sistema: (a) 87T; (b) 87Q; (c) REF.

IV. CONCLUSÕES

As ASPs aprofundam as análises feitas com os casos pontuais. Com as simulações realizadas, foram obtidas figuras de excelência a partir das quais é possível verificar que não é necessário aumentar a sensibilidade da função 87T de cada fase, para faltas entre espiras e espira-terra, uma vez que as funções 87Q e REF são desenvolvidas especialmente para suprir esta necessidade.

Verificou-se que os enrolamentos podem não ser totalmente protegidos pelas funções elétricas para todos os casos de curto-circuito, sendo necessário a atuação das proteções intrínsecas. Observou-se também que a função 87T só atua para uma faixa de carregamento do sistema, e que o intervalo que ela não atua, a capacidade de sobrecarga admissível do transformador é ultrapassada.

Além disto, constatou-se que quão maior o valor da força da fonte (SIR), menor a sua contribuição de corrente de curto-circuito, podendo não sensibilizar as funções de proteção. Estes resultados ilustram a importância das ASPs, pois, por meio destes é possível verificar se os parâmetros escolhidos para cada função implementada atendem a um número significativo de situações às quais o transformador está sujeito.

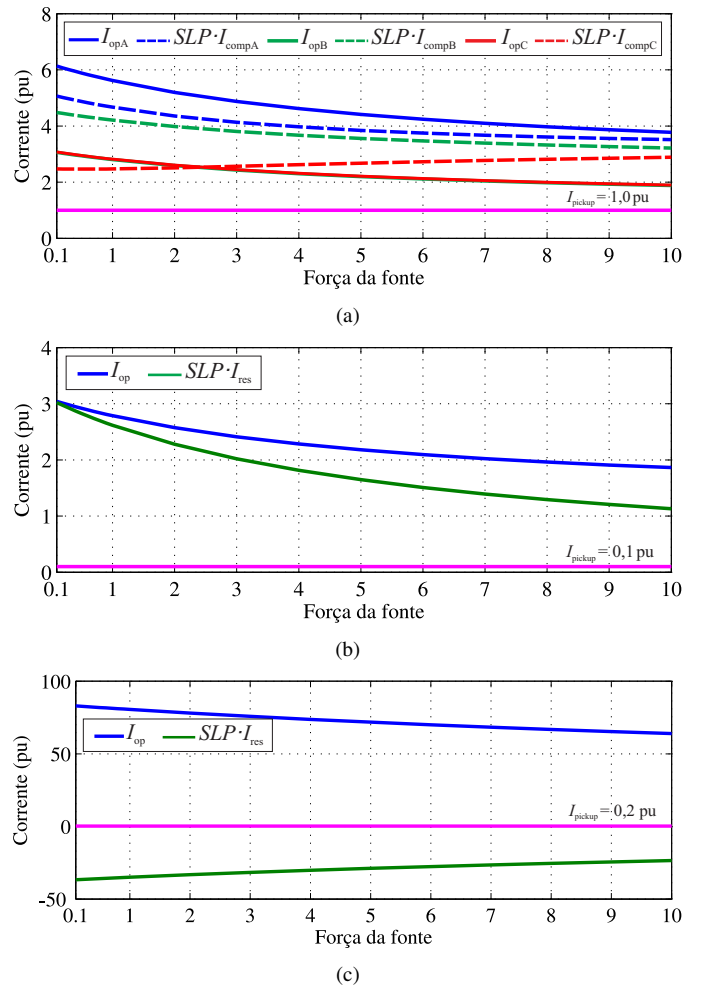


Figura 8. Comportamento das funções de proteção para variação da força da fonte do lado de alta tensão do transformador: (a) 87T; (b) 87Q; (c) REF.

REFERÊNCIAS

- [1] Y. G. Paithankar and S. R. Bhidé, *Fundamentals of Power System Protection*. New Delhi, India: Prentice-Hall, 2007.
- [2] S. H. Horowitz and A. G. Phadke, *Power System Relaying*, 3rd ed. West Sussex, England: John Wiley & Sons Inc, 2008.
- [3] F. Magrin, G. Rocha, and R. Abboud, "Modelagem de transformadores no rtds para simulação de faltas entre espiras e à terra." Recife: X Seminário Técnico de Proteção e Controle, 2010.
- [4] J. Wang and R. Hamilton, "Analysis of transformer inrush current and comparison of harmonic restraint methods in transformer protection," in *Protective Relay Engineers, 2008 61st Annual Conference for*, April 2008, pp. 142–169.
- [5] A. Guzman, N. Fischer, and C. Labuschagne, "Improvements in transformer protection and control," in *Protective Relay Engineers, 2009 62nd Annual Conference for*, March 2009, pp. 563–579.
- [6] K. Tavares and K. Silva, "Evaluation of power transformer differential protection using the atp software," *Latin America Transactions, IEEE*, vol. 12, no. 2, pp. 161–168, March 2014.
- [7] H. J. A. Ferrer and I. Edmund O. Schweitzer, "Modern solutions for protection, control and monitorin of eletronic power system," Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, Tech. Rep., 2010.
- [8] IEEE, *Guide for Protecting Power Transformers, IEEE Standard. C37.91-2008*: Jan., 2008.
- [9] P. M. Anderson, *Power System Protection*. Piscataway, New Jersey, EUA: John Wiley & Sons Inc., 1999.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5416: Aplicação de cargas em transformadores de potência - Procedimento.
- [11] M. J. Thompson and A. Somani, "A tutorial on calculating source impedance ratios for determining line length," Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, Tech. Rep., 2014.