

Análise do religamento monopolar em linhas de transmissão não convencionais ^{*}

Ozenir Dias ^{*}, Jhair S. Acosta ^{**}, Maria C. Tavares ^{**}

^{*} *Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Amazonas, Brasil*
E-mail: ofdias@ufam.edu.br

^{**} *Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil*
E-mails: jsacosta@dsce.fee.unicamp.br, ctavares@unicamp.br

Abstract: This paper analyzes the single-phase auto-reclosing in optimized single-circuit transmission lines (O-TLs). Optimized transmission lines have the advantage of transmitting higher power in a narrower space. However, because of the strong capacitive coupling in O-TLs the single-phase reclosing can be compromised. Accordingly, this paper presents a comparison between single-phase reclosing in conventional lines and O-TLs. Four scenarios were tested: conventional neutral reactor, optimal value, typical value of 800 Ω , and the proposed alternative method, in which the response is close to the limit values of secondary arc current, and transient recovery voltage. Results show that the single-phase auto-reclosing is not compromised in non-conventional lines as long as higher neutral reactors are designed.

Resumo: Este artigo apresenta uma análise do religamento monopolar em linhas de transmissão de circuito simples otimizadas (O-TLs). As linhas de transmissão otimizadas têm a vantagem de transmitir maior potência em uma faixa de servidão mais estreita, ou seja, com as fases mais próximas. Desta forma, devido ao forte acoplamento capacitivo nas O-TLs, o religamento monopolar pode ser comprometido. Nesse sentido, este artigo apresenta um estudo do religamento monopolar em linhas convencionais e nas O-TLs. Quatro cenários foram testados: reator de neutro convencional, reator com valor ótimo, com valor típico de 800 Ω , e um método alternativo para especificação do reator em que os valores de corrente de arco secundário e tensão de restabelecimento transitória se aproximam dos valores limites estabelecidos em normas. Os resultados mostram que o religamento monopolar não é comprometido em linhas não convencionais desde que os reatores de neutros instalados sejam corretamente especificados, sendo seus valores superiores aos usualmente utilizados.

Keywords: Conventional transmission line; Optimized transmission line; Fault analysis; Single-phase reclosing and Neutral reactor.

Palavras-chaves: Linha de transmissão convencional; Linha de transmissão otimizada; Análise de faltas; Religamento monopolar e Reator de neutro.

1. INTRODUÇÃO

A transmissão de energia é um aspecto fundamental no setor elétrico. Em países com extensões continentais como o Brasil é necessário transmitir grandes blocos de energia por longa distâncias. Esse procedimento é realizado através do Sistema Interligado Nacional (SIN) e operado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). À medida que a população e a demanda de energia aumenta é necessário garantir que as linhas de transmissão tenham capacidade de transmitir energia desde os centros de geração até os centros de carga, porém, deve-se evitar a utilização de grandes faixas de servidão (ROW). Normalmente, o sistema de transmissão é composto por linhas convencionais operando a 500, 750 e 1000 kV com mais de um sub-condutor por fase. Uma linha de transmissão opera com equilíbrio (baixo consumo e baixa geração) de potência reativa quando a potência transmitida aproxima-se da

potência natural ou característica da linha (SIL), sendo este valor uma referência para a linha.

Sabe-se que o uso de mais de um condutor por fase (formando um feixe de sub-condutores) aumenta o SIL devido ao aumento da capacitância da linha e à diminuição da indutância (Thomas (1909)) (parâmetros de sequência positiva).

O maior uso de sub-condutores no feixe começou na década de 1960, conforme mencionado em Abetti (1958) e Sandell et al. (1963). Nos Estados Unidos foi adotada uma separação típica de 0,457 m entre os sub-condutores, enquanto na Europa foram utilizados 0,4 m.

A primeira alternativa para aumentar o SIL das linhas de transmissão (LTs) usando sub-condutores não uniformemente distribuídos em uma geometria circular, e fases mais próximas, foi proposta em Alexandrov and Podporokyn (1991). Esse tipo de linha foi denominado como linha de potência natural elevada (LPNE ou HSIL).

^{*} Os autores agradecem o apoio financeiro das seguintes instituições: CAPES código 001, CNPq e FAPESP (2015/26096-0; 2017/20010-1).

À partir dessa proposta, diversas pesquisas sobre novos tipos de linhas LPNE foram desenvolvidas. Assim, Salari (1993) faz uma abordagem para aumentar o SIL buscando manter o equilíbrio de carga e corrente nos sub-condutores, resultando em um programa de computador chamado *OTLIN*, que mais tarde ficou conhecido como *ELEKTRA*. A proposta gerou configurações de feixes em geometrias pré-definidas, como circulares, elípticas, retangulares, entre outras. Maciel (2012) por sua vez fez uma abordagem usando otimização clássica com o método do gradiente. Posteriormente, Acosta and Tavares (2016) apresentaram novas geometrias que não seguem nenhuma forma fixa, através de uma abordagem heurística. Em Acosta and Tavares (2017), a metodologia foi estendida para analisar o aumento do SIL e a redução de custos.

Apesar dos avanços das linhas LPNE, para implementá-las em projetos reais é necessário verificar o comportamento do sistema para diferentes situações, como defeitos e manobras típicas do sistema de transmissão.

Os estudos de transitórios eletromagnéticos são de suma importância, tanto nas etapas pré-operativas e de recomposição do sistema, quanto na etapa da elaboração do projeto básico da rede. Essas análises estão previstas no Submódulo 23.3 dos Procedimentos de Rede - Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (2010), que estabelece diretrizes e critérios para os estudos elétricos. Dentre eles há o estudo destinado ao religamento automático da linha de transmissão. Quando ocorre um defeito na linha o sistema de proteção irá atuar para remover o trecho com falha e restabelecer o fornecimento de energia o mais breve possível. Esse processo é realizado através de uma manobra automática que pode ser monopolar (SPAR) ou tripolar. Na manobra tripolar, as três fases da linha de transmissão são abertas durante o defeito, independente do tipo de falta, e religadas após um tempo definido. Já a manobra monopolar pode ser utilizada para defeitos monofásicos, abrindo apenas a fase sob falta, religando-a após um tempo definido.

A utilização da manobra monopolar é a mais adequada para casos de faltas monofásicas, já que durante a manobra as demais fases continuam a transmitir energia, possibilitando um fluxo em torno de 54% da potência total no caso de linhas simples e até 75% nas linhas com circuitos duplos, Kimbark (1964). Também é possível melhorar a estabilidade e a confiabilidade do sistema e reduzir os impactos torcionais sobre os rotores de turbogeradores nesta manobra, Gonzalez et al. (1984), uma vez que o sistema continua interligado durante o defeito, apesar de operar em condições de desequilíbrio.

Nesse sentido, este artigo apresenta uma comparação entre o religamento monopolar em linhas convencionais (L_{conv}) e linhas LPNE. Quatro cenários foram testados: reator de neutro (X_n) convencional, X_n típico de 800 Ω , X_n ótimo, e X_n especificado de acordo com o método alternativo proposto pelos autores. Neste caso os valores da corrente de arco secundário e tensão de restabelecimento transitória se aproximam dos valores limites indicados nas normas e a sobretensão no reator de neutro é mediana. Os resultados mostram que o religamento monopolar não é comprometido nas linhas LPNE produzidas pela metodologia apresentada em Acosta and Tavares (2017). Os testes de

validação foram realizados em um simulador digital em tempo real (RTDS).

2. LINHA DE POTÊNCIA NATURAL ELEVADA

As linhas LPNE são basicamente linhas otimizadas com o objetivo de aumentar o seu SIL. Para obter essas linhas, é necessário resolver um problema de programação não linear inteiro misto (MINLP). Portanto, a linha de transmissão estudada neste trabalho foi projetada resolvendo o problema de otimização em (1) restringindo o tamanho do feixe b_s , as distâncias entre fases D_f , o número de condutores n_{sc} , a diferença de altura h_f entre a fase central e as fases externas, o campo elétrico no solo E_{solo} , o campo elétrico na superfície dos condutores E_{sup} , que não deve superar o campo E_{crit} que produz efeito corona, e o balanço de campo elétrico, conforme proposto em Acosta and Tavares (2017).

$$\max f = \frac{P_n}{\sum custo} = \frac{V_l^2 \sqrt{\tilde{y}_+}}{\sqrt{\tilde{z}_+} \sum custo} \quad (1)$$

Em (1) P_n é a potência característica da linha [MW]; V_l a tensão de linha [kV]; \tilde{z}_+ a impedância de sequência positiva por unidade de comprimento da linha [Ω]; \tilde{y}_+ a admitância de sequência positiva por unidade de comprimento da linha [S]; sendo *custo* associado aos isoladores, para-raios, elementos de suporte, alocação de condutores, fundações, reposicionamento de torres, comissionamento, montagem e material das torres, perdas por efeito Corona e por condução, e manutenção dos elementos, segundo apresentado em Acosta and Tavares (2017).

O algoritmo usado para criar a linha LPNE segue o pseudocódigo no algoritmo 1 e 2 em que x e y são as posições de cada condutor, considerando $s = 0, 1$.

Algoritmo 1 Otimização das linhas de transmissão - Busca semi-exaustiva

- 1: Inicializar parâmetros e limites
 - 2: **para** condutor Hawk a Thrasher **faça**
 - 3: Colocar as variáveis nos seus limites inferiores
 - 4: **enquanto** $E_{sup} > E_{crit}$ & $n_{sc} < \max n_{sc}$ **faça**
 - 5: $n_{sc} \leftarrow n_{sc} + 1$
 - 6: **enquanto** antigo (1) \neq novo (1) **faça**
 - 7: Avaliar a geometria e escolher a melhor
 - 8: Avaliar $f(b_s)$, $f(b_s + s)$, e $f(b_s - s)$.
 - 9: Atualizar b_s segundo o maior valor de f .
 - 10: Avaliar $f(h_f)$, $f(h_f + s)$, e $f(h_f - s)$.
 - 11: Atualizar h_f segundo o maior valor de f .
 - 12: Guardar os valores das variáveis
-

3. CONCEITOS BÁSICOS DO SPAR

O religamento monopolar automático consiste em realizar abertura da fase sob falta na ocorrência de um defeito monofásico e, após um tempo pré-determinado conhecido como tempo morto, religar apenas os polos do disjuntor da fase defeituosa em ambas as extremidades da linha de transmissão. Quando surge o defeito monofásico a corrente de curto-circuito é chamada corrente de arco primário. Essa corrente existe desde a formação do arco até o

Algoritmo 2 Otimização das linhas de transmissão -
Otimização local

- 1: Criar uma geometria inicial usando a melhor solução obtida no algoritmo anterior
 - 2: Avaliar (1)
 - 3: **enquanto** antigo (1) \neq novo (1) **faça**
 - 4: **para** cada condutor das fases externas **faça**
 - 5: Avaliar $f(x)$, $f(x + s)$, e $f(x - s)$.
 - 6: Atualizar x segundo o maior valor de f .
 - 7: Avaliar $f(y)$, $f(y + s)$, e $f(y - s)$.
 - 8: Atualizar y segundo o maior valor de f .
 - 9: **para** cada condutor da fase central **faça**
 - 10: Avaliar $f(x)$, $f(x + s)$, e $f(x - s)$.
 - 11: Atualizar x segundo o maior valor de f .
 - 12: Avaliar $f(y)$, $f(y + s)$, e $f(y - s)$.
 - 13: Atualizar y segundo o maior valor de f .
-

momento da abertura do polo do disjuntor sob falta e possui um alto valor, podendo atingir dezenas de kA.

Após a abertura dos disjuntores nas duas extremidades o arco elétrico pode continuar existindo por um determinado período e é denominado arco secundário. Esse arco é mantido através do acoplamento capacitivo e indutivo das fases sãs com a fase aberta que se encontra flutuando (isolada). O arco elétrico agora é denominado arco secundário e o valor da corrente de arco secundário (I_{sec}) é reduzido para centenas ou dezenas de amperes em linhas convencionais.

O sucesso dessa manobra depende basicamente da extinção do arco secundário. A probabilidade de extinção rápida do arco está diretamente relacionada à amplitude da corrente do arco, entre outros fatores. Quanto menor for I_{sec} mais rápido o arco se extinguirá naturalmente, restabelecendo a condição de operação normal da linha de transmissão.

Algumas características das linhas de transmissão podem dificultar a auto-extinção do arco secundário, sendo necessário adotar medidas mitigadoras. Para linhas longas regulares (com até 400 km de comprimento), é necessário inserir uma compensação reativa de derivação para reduzir a sobretensão sustentada quando a linha está em vazio ou em operação com carga leve (efeito Ferranti). Essa compensação é feita através de reatores instalados nas duas extremidades da linha, o que compensará a admitância transversal de sequência positiva da linha.

Normalmente é adicionado um quarto reator (Kimbark (1964)) conectado entre o neutro do banco de reatores e a terra, chamado de reator de neutro, acarretando na anulação ou minimização da admitância transversal entre fases (acoplamento mútuo) (Zevallos and Tavares (2011)), sendo esta a principal fonte de alimentação do arco secundário. O reator de neutro também desloca eventuais ressonâncias em função da compensação das linhas. Na Fig. 1 é apresentado o arranjo de compensação reativa conhecida como reator de 4 pernas: reator de linha + reator de neutro.

Para definir o valor do reator de neutro alguns métodos de cálculo são propostos na literatura, sendo o principal o apresentado em Kimbark (1964) através da equação (2).

$$X_n = (X_0 - X_1)/3 \quad (2)$$

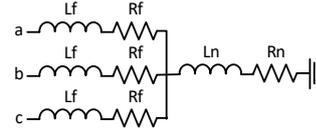


Figura 1. Reatores de fase e de neutro, ou "Reator de 4 pernas".

Onde X_n é o reator de neutro [Ω]; X_0 a reatância de sequência zero [Ω] e X_1 a reatância de sequência positiva [Ω] do reator de 4 pernas, respectivamente.

Para se determinar o valor do reator de neutro da equação (2) são utilizados principalmente dois métodos que serão denominados convencional e ótimo.

Método convencional: Apresenta uma relação entre a reatância de sequência zero (X_0) com a reatância de sequência positiva (X_1) definida pelo projeto. Esse método é aproximado e para este artigo a relação adotada foi de $X_0/X_1 = 1,5$.

Método ótimo: Em Zevallos Alcahuaman (2007) é proposto um equacionamento matemático para minimizar o acoplamento capacitivo entre fases através da inserção do reator de neutro das extremidades da linha de transmissão. Esse trabalho apresentada detalhadamente todo o procedimento de cálculo para se determinar o valor ótimo do reator neutro, utilizando-se como base a equação (2).

Além disso, em estudos pré-operacionais de religamento automático são empregados valores típicos de reatores de neutro. No Brasil, é definido tanto em estudos realizados pela empresa de pesquisas energéticas EPE (2017) como em editais de leilão de linha de transmissão da ANEEL (2013), o valor de 800 Ω para o reator de neutro em linhas de transmissão de 500 kV.

Com intuito de avaliar a viabilidade da auto-extinção do arco secundário e o sucesso do religamento monopolar são adotados critérios baseados em algumas grandezas, como por exemplo: o valor eficaz da I_{sec} , tensão de restabelecimento transitório nos terminais do arco (TRT ou TRV) e o tempo morto de execução do religamento monopolar. No caso do Brasil, a Agência de Energia, ANEEL, estabelece os critérios pré-operacionais que relacionam tais grandezas com o tempo morto.

A parte esquerda da Fig. 2 mostra uma curva que associa a I_{sec} com o primeiro pico da TRT. Se os valores obtidos para a linha em estudo se encontrarem dentro da zona de provável extinção do arco secundário ao final de um tempo morto de 500 ms, existe uma alta probabilidade de que a manobra seja realizada com sucesso. Para tempo morto superior a 500 ms é utilizado o critério apresentado na parte direita da Fig. 2. Este critério utiliza apenas o valor eficaz da I_{sec} para determinar o tempo morto (t_m).

Tais curvas são utilizadas em estudos pré-operacionais e apresentadas no procedimento de redes do ONS e nos documentos regulatórios da ANEEL. Porém, vale destacar que essas curvas foram levantadas através de ensaios realizados para linhas de transmissão com nível de tensão em torno de 400 kV na década de 70 (Balossi et al. (1966)), e por se tratar de um fenômeno não linear a extrapolação para outras faixas de tensão deve ser adotada tendo em

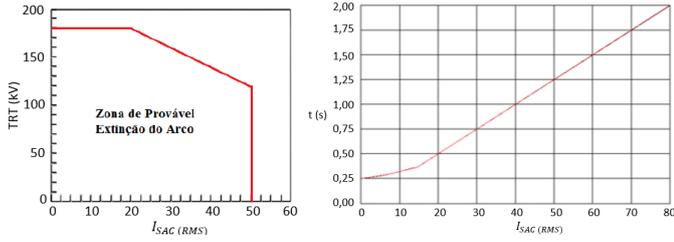


Figura 2. Curvas referência: Esquerda - zona de provável extinção da I_{sec} considerando $t_m = 500$ ms; Direita - t_m para extinção do arco secundário para linhas de até 765 kV.

mente que há um claro grau de imprecisão. Para tensões superiores são considerados os valores limites de correntes de arco secundários superiores ao apresentado.

Neste trabalho será utilizada a curva da esquerda da Fig. 2 para uma extinção em menos de 500 ms, tanto para linhas convencionais como para linhas LPNE. Os testes serão feitos e os resultados serão gerados de forma aderente a aquela curva.

Além disso, um novo método de determinação do reator de neutro é proposto neste artigo, intitulado método alternativo. O método alternativo determina o valor do reator de neutro que apresenta a resposta mais próxima do limiar factível da curva da Fig. 2.

O presente fluxograma apresentado na Fig. 3 mostra o passo a passo do método alternativo.

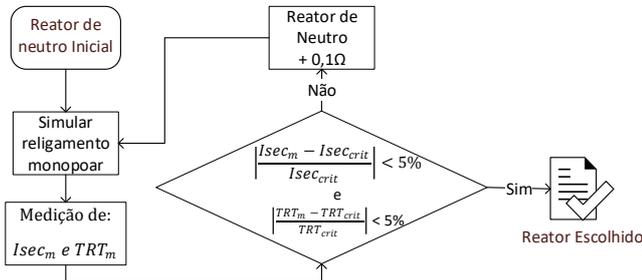


Figura 3. Fluxograma do método alternativo.

O valor do reator de neutro inicial é encontrado através da equação (2), em seguida os valores da corrente de arco secundário (I_{sec}) e da tensão de restabelecimento transitória (TRT) são comparados com os valores do critério de extinção do arco secundário. Se a diferença entre os valores for menor do que 5%, esse será o valor ideal para o reator, caso isso não ocorra é adicionado um incremento no valor de reator de neutro de $0,1 \Omega$ e o caso é simulado novamente. Esse procedimento é realizado para faltas deslizantes ao longo da linha, e é determinado o reator de neutro que atenda a todos os casos.

4. TESTES E RESULTADOS

Com intuito de realizar os testes de religamento monopolar em linhas convencionais e em linhas otimizadas, utilizou-se o sistema teste apresentado na Fig. 4. A linha de transmissão tem 350 km e foi modelada com transposição real. As duas linhas consideradas foram a convencional, apresentada na Fig. 5 superior, e a otimizada, apresentada

na Fig. 5 inferior, cuja silhueta foi obtida com base na metodologia proposta em Acosta and Tavares (2017). Observe que a linha não convencional apresenta SIL quase 40% superior ao da linha convencional, e uma faixa de servidão 25% menor. Contudo, a corrente do arco secundário é maior do que no caso da linha convencional.



Figura 4. Sistema teste com transposição real.

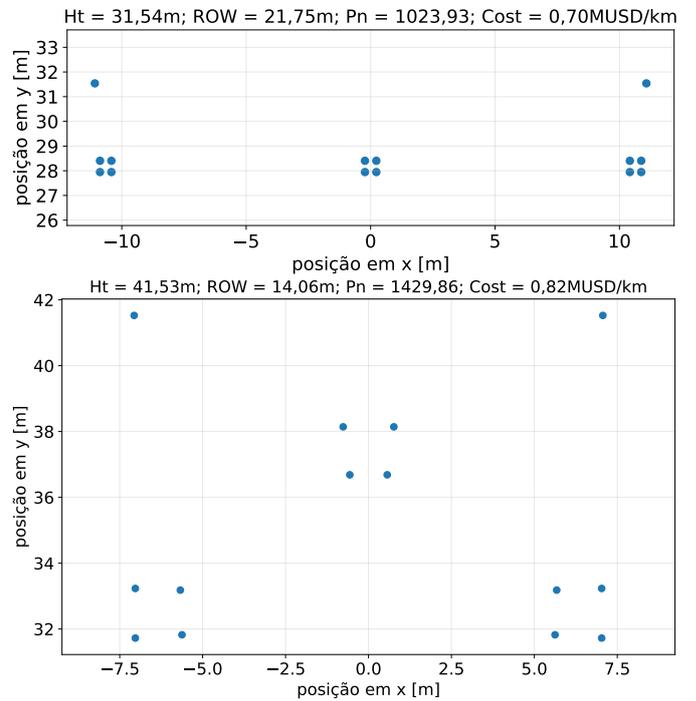


Figura 5. Figuras: Superior - Linha de transmissão convencional de 500 kV; Inferior - Linha de transmissão de 500 kV otimizada.

Os sistemas testes ajustados para transmitir 1 SIL, apresentados na Tabela 1, foram testados para 4 cenários: reator de neutro convencional, valor ótimo, valor típico de 800Ω e um método alternativo proposto pelos autores. Os dados de cada cenário são apresentados na Tabela 2.

Os testes foram realizados através da aplicação de uma falha monofásica com resistência de 10Ω ao longo da linha de transmissão e, como consta nos procedimentos de rede do ONS, foi realizada a variação da frequência: 58, 60 e 62 Hz.

Para o primeiro caso analisado pode-se verificar através das Figuras 6 e 7 que os valores de I_{sec} e da TRT foram baixos para a linha convencional, atendendo ao limite factível da Figura 2. Já para a linha LPNE, tais valores são bem superiores ao limite estabelecido. Em relação à

variação do ponto de defeito ao longo da linha, pode-se verificar que não houve variação importante para ambas as linhas. Somente neste primeiro caso o reator de neutro da linha convencional é superior ao especificado para a linha LPNE.

Tabela 1. Dados dos sistemas.

Geradores (SE1 e TH1)				
Linha	V[kV]	$R_1[\Omega]$	$X_1[\Omega]$	
Convencional	512,6 \angle 3,41°	0,00041	0,0144	
LPNE				
Fontes equivalentes (SE2 e TH2)				
Linha	V[kV]	Componente	R[Ω /km]	X[Ω /km]
Convencional	498,7 \angle -2,5°	Zero	11,547	57,735
		Positiva	1,924	11,547
LPNE	498,7 \angle -8°	Zero	11,547	57,735
		Positiva	1,924	11,547
Linhas de transmissão				
Linha	Componente	R[Ω /km]	X[Ω /km]	Y[μ S]
Convencional	Zero	0,4203	1,5380	3,2393
	Positiva	0,0161	0,3173	5,2532
LPNE	Zero	0,4078	1,5327	3,0781
	Positiva	0,0153	0,2267	7,2851
Reatores de fase				
Linha	Compensação (%)	Potência (Mvar)	X/R	
Convencional	70	3x54,04	400	
LPNE	70	3x76,15	400	

Tabela 2. Dados do reator de neutro.

Tipo de linha	Método de cálculo	R [Ω]	X [Ω]
Convencional	$X_0/X_1 = 1,5$	6,43	257
	Ótimo	13,70	548
	Típico no Brasil	20,00	800
	No limite da região factível	3,30	132
	$X_0/X_1 = 1,5$	4,55	182
LPNE	Ótimo	32,60	1304
	Típico no Brasil	20,00	800
	No limite da região factível	11,80	472

Nas Figuras 8 e 9 são apresentados os resultados para o segundo caso. Para todos os casos I_{sec} e TRT apresentaram valores baixos, atendendo ao limite factível para ambas as linhas utilizadas. Os valores de corrente I_{sec} medidos variaram consideravelmente com o local de defeito, especialmente para linha LPNE que teve o valor do reator de

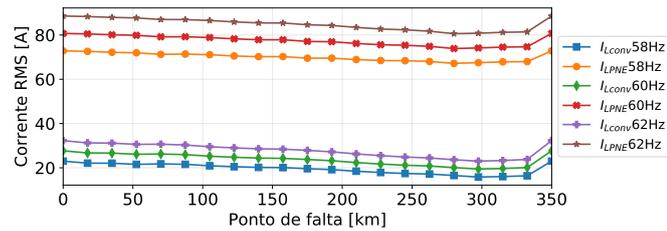


Figura 6. I_{sec} - L_{conv} e LPNE para X_n com relação $X_0/X_1 = 1,5$.

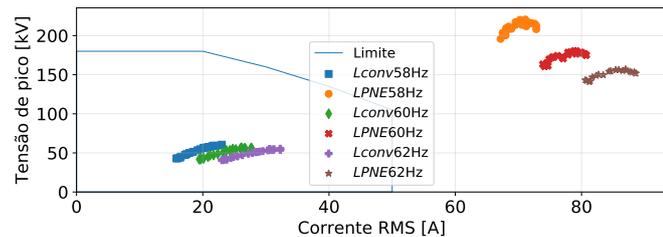


Figura 7. TRT vs I_{sec} - X_n com relação $X_0/X_1 = 1,5$.

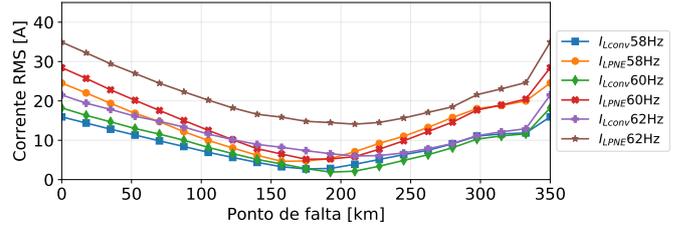


Figura 8. I_{sec} - L_{conv} e LPNE para X_n ótimo.

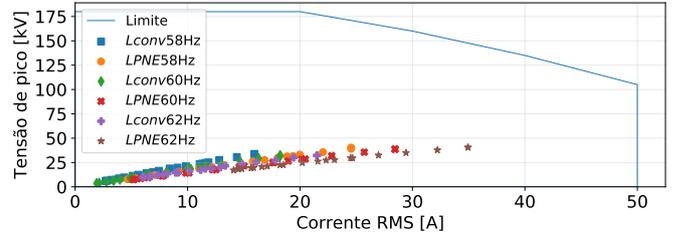


Figura 9. TRT vs I_{sec} - X_n ótimo.

neutro calculado muito superior aos demais casos. Vale mencionar que o reator de neutro da linha LPNE é aproximadamente 2,5 vezes o valor da linha convencional.

Para o método típico com reator de neutro fixo de 800 Ω , verificou-se uma resposta semelhante para o caso ótimo. Como pode ser verificado nas Figuras 10 e 11, em ambas linhas os valores dos reatores de neutro resultaram em atendimento ao limite factível. Destaca-se uma menor variação das grandezas medidas com a mudança do ponto de falha para a linha LPNE, uma vez que houve uma redução no reator de neutro. Para a linha convencional o valor do reator de neutro é superior ao do caso ótimo, o que resulta maiores correntes I_{sec} .

Nas Figuras 12 e 13 são apresentados os resultados do teste com o método proposto neste artigo. A ideia do método é encontrar o valor do reator de neutro próximo do limite factível para defeitos ao longo da linha de transmissão. Pode-se notar que os resultados apresentam valores satisfatórios para ambas as linhas testadas, exceto para o caso com a variação da frequência em 62 Hz. Verificou-se uma variação dos valores monitorados acompanhando a variação da frequência do sistema, ou seja, com o aumento da frequência (62 Hz) os valores de I_{sec} e TRT aumentam, e se reduzem com o decaimento da frequência (58 Hz). Esse decaimento ou elevação deriva da variação dos parâmetros do sistema com a mudança da frequência (variação das reatâncias e admitâncias). É interessante observar que para o método proposto neste trabalho, no limiar do limite factível, o reator foi otimizado considerando a frequência de operação do sistema, acarretando em não atendimento

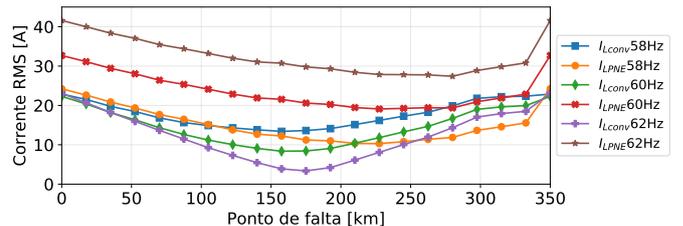


Figura 10. I_{sec} - L_{conv} e LPNE para X_n de 800 Ω .

REFERÊNCIAS

- Abetti, P.A. (1958). Bibliography on extra-high-voltage systems. *Trans. Am. Inst. Electr. Eng. Part III Power Appar. Syst.*, 77(3), 1517–1535.
- Acosta, J.S. and Tavares, M.C. (2016). Enhancement the overhead transmission lines' capacity by modifying the bundle geometry using heuristics algorithms. In *IEEE PES Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf.*, volume Decem, 646–650. IEEE.
- Acosta, J.S. and Tavares, M.C. (2017). Methodology for optimizing the capacity and costs of overhead transmission lines by modifying their bundle geometry. *Electr. Power Syst. Res.*
- Alexandrov, G.N. and Podporkyn, G.V. (1991). Improvement of the efficiency of 35 to 220 kV lines. *Int. Conf. AC DC Power Transm.*, 5, 226–231.
- ANEEL (2013). Instalações De Transmissão compostar por: LT 500kV Miracema - Gilbués II C3 LT 500kV Gilbués II - Barreiras II C2.
- Balossi, A., Malaguti, M., and Ostano, P. (1966). Laboratory Full-Scale Testes For Determination Of The Secondary Arc Extinction Time In High-Speed Reclosing. In *IEEE Summer Power Meeting*. New Orleans - United States of America.
- EPE (2017). Estudos para a licitação da expansão da transmissão. Technical report, Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro.
- Gonzalez, A.J., Kung, G.C., Raczkowski, C., Taylor, C.W., and Thonn, D. (1984). Effects of Single- And Three-Pole Switching and High-Speed Reclosing on Turbine-Generator Shafts and Blades. *IEEE Trans. Power App. Syst.*, PAS-103(11), 3217–3228.
- Kimbark, E.W. (1964). Suppression of Ground-Fault Arcs on Single-Pole- Switched EHV Lines by Shunt Reactors. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 83(3), 285–290.
- Maciel, R.d.P. (2012). Maximization of Characteristic Power of Transmission Lines (in portuguese). In *4o Semin. Bras. Sist. Elétricos SBSE*, 1–6. Goiânia, GO, Brazil.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (2010). Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos.
- Salari, J.C. (1993). *Otimização da geometria dos feixes de condutores de linhas de transmissão*. Ph.D. thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Sandell, D.H., Shealy, A.N., White, H.B., and Sandell, D.H. (1963). Bibliography on Bundled Conductors. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, 82(69), 1115–1128.
- Thomas, P.H. (1909). Output and Regulation in Long-Distance Lines. *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, XXVIII(1), 615–640.
- Zevallos, M.E. and Tavares, M.C. (2011). Single-Phase Auto-Reclosure Studies: Influence of Transversal Parameters of a Transmission System on the Secondary Arc Current Reduction. In *Int. Conf. Power Syst. Transients*, 1–6. Delft, The Netherlands.
- Zevallos Alcahuaman, M.E. (2007). *Análise de sensibilidade da corrente de Arco Secundário para diferentes linhas de transmissão*. Mestrado, Universidade Estadual de Campinas.

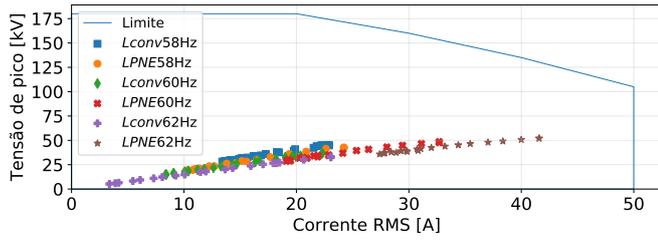


Figura 11. TRT vs I_{sec} - X_n de 800 Ω .

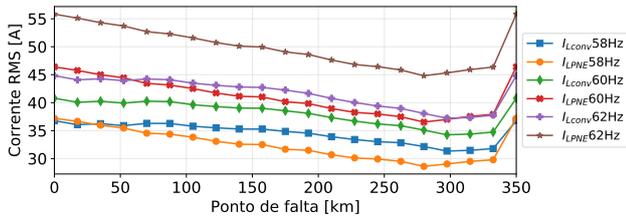


Figura 12. I_{sec} - L_{conv} e LPNE para X_n no limite da região factível.

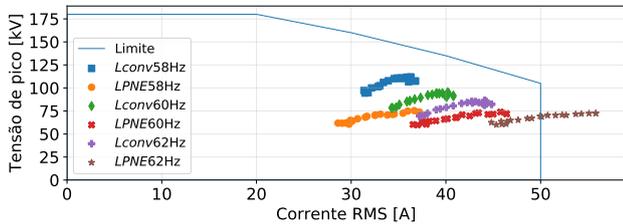


Figura 13. TRT vs I_{sec} - X_n no limite da região factível.

às normas para a frequência de 62 Hz, como pode ser observado na Figura 13. Se for julgado relevante a otimização deverá incluir a análise para diferentes frequências de modo a atender ao estabelecido nas normas.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizada a comparação do religamento monopolar em linhas convencionais e linhas otimizadas com alta potência natural. Foram aplicadas faltas monofásicas ao longo da linha de transmissão considerando a variação da frequência do sistema e ambos sistemas operando a plena carga (1,0 SIL). Quatro cenários foram testados: reator convencional, valor ótimo, valor típico de 800 Ω e um método alternativo proposto pelos autores.

Verificou-se que o equacionamento clássico de $X_0/X_1 = 1,5$ não atende aos requisitos de I_{sec} e TRT para linhas LPNE. Além disso, para um comportamento correto, a linha não convencional deve ter um reator neutro quase 3 vezes maior do que o das linhas convencionais para compensar o maior acoplamento das linhas LPNEs. Com a proposta apresentada, os valores de TRT e I_{sec} ficaram dentro dos limites estabelecidos, assim como no caso do reator neutro de 800 Ω e com o reator neutro ótimo. A vantagem do método proposto está na redução do valor do reator neutro, o que resulta na redução de custo na aquisição do mesmo com desempenho adequado para a manobra de religamento monopolar. Deve-se destacar que com o método proposto a manobra não terá garantia de sucesso se a frequência do sistema for de 62 Hz, uma vez que o reator foi otimizado para a frequência nominal.