

Comparação Entre o Religamento Monopolar Tradicional e a Técnica Adaptativa Baseada na Medição do Conteúdo Harmônico

Ozenir Dias

Maria Cristina Tavares

Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação (FEEC)

Campinas, São Paulo - Brasil

ozenirfd@dsce.fee.unicamp.br, cristina@dsce.fee.unicamp.br

Resumo — Neste trabalho são apresentados os resultados da análise da técnica de religamento monopolar comparando o desempenho do procedimento tradicional e do procedimento adaptativo rápido baseado na medição do conteúdo harmônico das tensões nas extremidades da fase sob falta da linha de transmissão. O sistema estudado foi baseado num sistema de 500 kV real do sistema elétrico brasileiro. O trabalho destaca as vantagens da utilização da técnica adaptativa frente à utilização da manobra tradicional.

Palavras-chave -- Arco secundário, Religamento monopolar e adaptativo, Sistema de proteção, Distorção harmônica, RTDS.

I. INTRODUÇÃO

As faltas no sistema elétrico em sua grande maioria envolvem linhas de transmissão. Neste universo a falta monofásica de natureza transitória é a mais frequente. A falta monofásica responde por 79,5 % do total das faltas em linhas de 138 kV, já para linhas de 500 kV, que é o foco deste trabalho, este tipo de falta atinge 80,6 %. Quando ocorre uma falta, o sistema de proteção deve intervir e eliminar rapidamente a falta com intuito de manter a estabilidade do sistema, não deixar o problema atingir mais elementos e restabelecer o fornecimento de energia o mais rapidamente possível.

A utilização da manobra monopolar é 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 [1]. Também é possível melhorar a estabilidade e a confiabilidade do sistema e reduzir os impactos torcionais sobre os rotores de turbogeradores nesta manobra [2], uma vez que o sistema continua interligado durante o defeito, apesar de operar em condições de desequilíbrio.

O sucesso desta manobra depende principalmente da extinção do defeito antes do religamento da fase aberta ser efetuado.

Em esquemas de religamento monopolar tradicionais o tempo morto, que corresponde ao tempo entre a abertura e o fechamento do disjuntor, é fixado em um valor alto, variando de 500 ms a 1 s, de modo a permitir que o defeito seja eliminado naturalmente. Supondo que o defeito seja transitório e ao final de um tempo se extinga naturalmente, em alguns casos este tempo fixo pode ser superior ao necessário para a extinção do defeito, resultando em um tempo excessivo para religar a fase aberta, deixando o sistema desequilibrado por um longo período. Por outro lado, o tempo morto pode ser inferior ao necessário para que a falta se extinga naturalmente, resultando em religamento sobre a falta, ou seja, manobra sem sucesso.

Em função destas características algumas formas inteligentes de religamento monopolar estão sendo discutidas no cenário mundial, sendo estas chamadas de religamento monopolar adaptativo [3], [4], [5], [6]. Tais pesquisas buscam estimar o instante de extinção do arco e distinguir as faltas transitórias das faltas permanentes. O religamento adaptativo oferece vantagens em relação à técnica tradicional: aumenta as chances de um religamento ter sucesso, melhora a estabilidade, se possível minimiza o tempo morto e reduz o impacto diante de uma falta permanente [3].

II. RELIGAMENTO MONOPOLAR ADAPTATIVO

O esquema de religamento monopolar adaptativo rápido proposto neste trabalho baseia-se na medição do conteúdo harmônico da tensão fase-terra nas extremidades da fase sob falta. Tal conteúdo harmônico já foi investigado por vários pesquisadores dentre os quais pode-se citar [6], [7], [8] e [9]. Para ilustrar este comportamento são apresentados na tabela I, retirado de [10], o conteúdo harmônico de arcos elétricos semelhantes aos arcos secundários gerados artificialmente [11].

Nestes ensaios foram monitoradas a corrente de arco secundário e a tensão entre os terminais do arco. Os conteúdos harmônicos da tensão e da corrente de arco secundário foram analisados para cada teste e determinou-se a sua assinatura harmônica através de um tratamento estatístico. Foi verificado

que o conteúdo harmônico da tensão é mais significativo do que o da corrente e que as componentes mais significativas são as ímpares, especificamente a terceira, quinta e sétima harmônicas. As demais harmônicas de ordem ímpar também estão presentes, mas a amplitude das harmônicas decai com o aumento da sua ordem, tornando as harmônicas ímpares de ordem elevadas menos importantes para a caracterização do fenômeno.

Tabela I. CONTEÚDO HARMÔNICO DE TENSÃO NO ARCO SECUNDÁRIO [9].

Corrente (A_{ef})	15	30	50	60	100
Número de testes	28	32	15	102	71
Harmônicas	$\frac{h_n}{h_1}$ (%)	$\frac{h_n}{h_1}$ (%)	$\frac{h_n}{h_1}$ (%)	$\frac{h_n}{h_1}$ (%)	$\frac{h_n}{h_1}$ (%)
2ª	3,30	2,75	3,16	2,51	2,87
3ª	27,51	22,33	22,71	25,32	27,07
4ª	1,99	1,30	1,49	1,22	1,46
5ª	10,87	6,42	5,97	7,31	9,07
7ª	4,87	2,29	1,98	2,71	3,49
9ª	2,37	0,92	0,83	1,17	1,60

Nota-se que o conteúdo harmônico apresenta um comportamento similar para vários ensaios e para todas as classes de corrente analisadas. Também se pode observar a forte predominância das componentes de terceira, quinta e sétima ordem em todos os ensaios, sendo os valores apresentados as médias obtidas dos ensaios.

O esquema de religamento adaptativo proposto foi modelado através da interação entre o relé de proteção e o medidor do conteúdo harmônico. A filosofia de funcionamento é baseada nas seguintes premissas:

- Para falta permanente o esquema bloqueia o religamento automático e gera abertura tripolar dos disjuntores da linha de transmissão em falta.
- Para falta transitória é detectado o instante de extinção da corrente de arco secundário, em seguida é liberado o religamento da fase aberta.

O fluxograma na figura 1 resume o esquema elaborado. É apresentada a solução para aplicação do religamento monopolar, porém, o mesmo processo pode ser utilizado para o religamento tripolar para casos de faltas monofásicas, o que não foi tratado no presente trabalho.

O esquema proposto foi dividido em dois algoritmos. Primeiramente, obtém-se o sinal vindo do relé e habilita-se o algoritmo para identificar se a falta é permanente. Este processo é realizado durante um tempo fixo de 450 ms pelo medidor de qualidade SEL 735. Este intervalo de tempo foi estabelecido para se evitar erros na análise durante o transitório inicial da medição. Este transitório decorre tanto pelo tratamento numérico do sinal quanto pelo transitório no arco elétrico após a abertura da fase sob defeito. Por se estar utilizando um medidor de qualidade utilizou-se um intervalo de tempo mais elevado em função da sua janela de amostragem. Depois de

transcorrido este tempo, caso a falta não seja classificada como permanente, o algoritmo de detecção da extinção da corrente de arco secundário é habilitado. Após a extinção da falta o relé enviará comando para religamento da fase.

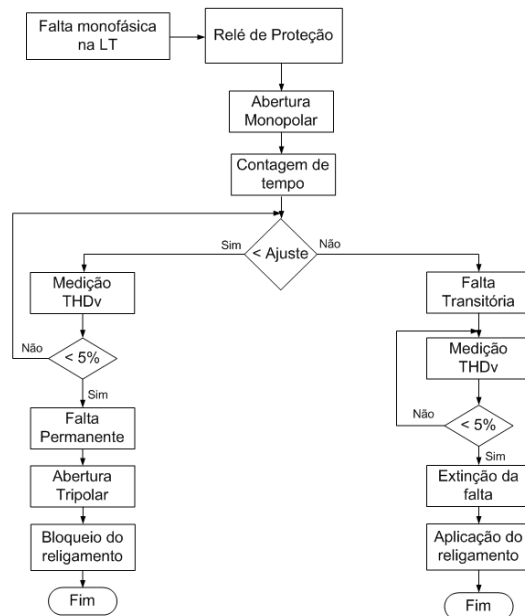


Figura 1. Fluxograma do esquema adaptativo.

III. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

As simulações foram realizadas no Simulador Digital em Tempo Real (RTDS). O RTDS é um equipamento desenvolvido para estudos em tempo real de fenômenos transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência. Uma de suas características é a aplicação de testes em malha fechada, uma vez que devido à sua alta velocidade de processamento os resultados das simulações são percebidos pelos equipamentos conectados ao RTDS como se fossem medidas de campo. Desta forma, dispositivos de controle e proteção comerciais são conectados ao RTDS para interações com simulações em sistemas elétricos de potência.

Para realizar a proteção do sistema foi utilizado o relé SEL-421 [12]. Este equipamento é um relé de proteção de linhas de transmissão de alta velocidade que possibilita a realização das manobras de abertura e religamento monopolar e tripolar, com verificação de sincronismo, monitoramento do estado do disjuntor, proteção de falha do disjuntor, correção para compensação série e desenvolvimento de lógicas de proteção. O relé teve a função de religamento monopolar habilitada de modo que o equipamento foi utilizado para identificar a falta, abrir a fase sob falta e religar a fase de acordo com o método desenvolvido.

Para realizar a medição do conteúdo harmônico da tensão na extremidade da fase aberta foi utilizado o medidor SEL-735 [13]. O medidor possui extensa capacidade de medição e registro de dados. Também possui um recurso que possibilita a execução de equações de controle para implementação fácil e flexível de esquemas de automação utilizando as medições realizadas, conhecido como SELÓGIC. Os equipamentos de medição do conteúdo harmônico são construídos seguindo a

norma IEC61000-4-7, que define uma janela de amostragem da forma de onda para o cálculo da transformada de Fourier com duração de 200 ms, tanto para sistemas de 50 Hz como para 60 Hz.

Quanto maior a largura da janela de amostragem melhor será a precisão no domínio da frequência, porém, menor é a precisão do conteúdo harmônico no domínio do tempo. Para o caso de medidores comerciais é necessária a medição de inter-harmônicas, então, é desejável uma resolução na ordem de 5 Hz (janelas de 200 ms), o que resultou numa resposta mais lenta para o teste proposto.

Os dois equipamentos citados foram conectados entre si e ao RTDS através das portas analógicas e digitais. A simulação foi feita em malha fechada, sendo que o relé executou a proteção do sistema e o subsequente religamento. Já o medidor de grandezas monitorou o conteúdo harmônico, e, de acordo com o algoritmo implementado, enviou o comando de bloqueio ou religamento para o religamento para o relé.

IV. SISTEMA ELÉTRICO TESTE

O sistema de transmissão utilizado neste trabalho é baseado nas características da interligação Nordeste-Sudeste pertencente ao sistema interligado nacional brasileiro (SIN). O sistema simulado é composto por três unidades geradoras, o transformador elevador e uma linha de 500 kV de 350 km, com compensação reativa em derivação, apresentado na figura 2. Os parâmetros da linha para a frequência fundamental (60 Hz) são mostrados na tabela II.

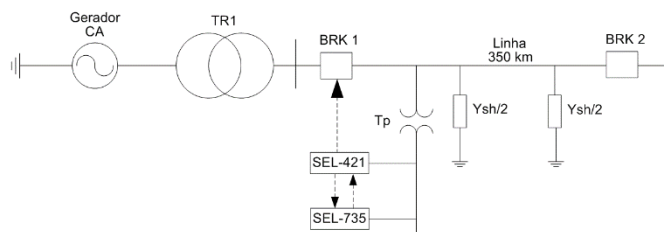


Figura 2. Diagrama unifilar do sistema elétrico teste.

Tabela II. PARÂMETROS DA LINHA DE TRANSMISSÃO.

Sequência	Séries (Ω/km)	Shunt ($\mu\text{S}/\text{km}$)
Positiva/Negativa	$0,0161 + j 0,2739$	$j 6,0417$
Zero	$0,4352 + j 1,4427$	$j 3,5227$

A linha utilizada é compensada em 70 % por meio de reatores em derivação instalados nas suas duas extremidades. A potência destes reatores é de 188 Mvar, com um fator de qualidade de 400. Foi adicionado um quarto reator conectado entre o neutro do banco de reatores e a terra, chamado de reator de neutro, acarretando na minimização da admitância transversal da linha de transmissão.

No presente trabalho o reator de neutro foi utilizado para obter arcos secundários ao longo da linha em vazio com valores de 15 Aef e 60 Aef. Os parâmetros do reator de neutro para cada teste são apresentados na tabela III.

Foram realizados testes com a mesma linha de transmissão com comprimento reduzido de modo a obter corrente de arco secundário de 15 Aef, resultando em linha de 70 km sem compensação.

Tabela III. PARÂMETROS DA REATOR DE NEUTRO.

Compensação Shunt – Reator de Neutro		
Teste	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)
15 Aef Compensado	1,946	414,7
60 Aef	1,1788	79,17

V. MODELO DE ARCO SECUNDÁRIO

Para representar a falta transitória foi utilizado o modelo de arco elétrico do RTDS de acordo as referências [14] e [15]. Ambos os arcos primário e secundário são modelados da mesma forma, com apenas uma constante de tempo, podendo ser alterada para cada caso. A característica do arco é descrita na equação 1, onde g é a condutância dinâmica do arco que varia no tempo, G é a condutância estacionária do arco e T é a constante de tempo. T é calculado a cada meio-ciclo, uma vez que depende do valor de pico da corrente no meio ciclo anterior (I_{mx}) e o comprimento do arco (l_{arco}), como mostrado na equação 2. Para arcos primários, α é fixado em $2,85 \cdot 10^{-2}$ ms [14]. Para arcos secundários T é calculado de acordo com a equação 3. β é fixado em 2, 51 ms [14]. Utilizaram-se arcos com as seguintes características descritas na tabela IV para cada teste realizado.

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{T} (G - g) \quad (1)$$

$$T = \alpha \frac{I_{mx}}{I_{arco}} \quad (2)$$

$$T = \beta \frac{\sqrt{I_{mx}}}{I_{arco}} \quad (3)$$

Tabela IV. PARÂMETROS DO MODELO DE ARCO.

Teste	Comprimento do arco Primário (m)	Velocidade de crescimento do arco secundário (m/s)
15 Aef	4	43
15 Aef Compensado	4	60
60 Aef	4	80

VI. SIMULAÇÕES REALIZADAS

Os testes realizados consistiram na aplicação do defeito monofásico no sistema de transmissão variando o comprimento da linha e o valor de reator de neutro de acordo com o descrito na seção anterior. Para testar o esquema proposto foram aplicadas faltas monofásicas permanentes e transitórias. Para o caso tradicional foi fixado um tempo morto fixo de 500 ms e para o religamento adaptativo foi utilizado o medidor SEL-735 de acordo com a metodologia apresentada.

A manobra simulada consistiu na energização da linha em vazio e a subsequente aplicação da falta monofásica na fase A. Para faltas monofásicas permanentes o valor da resistência de falta utilizado foi de 1Ω . Para o caso de faltas transitórias a falta foi representada através do modelo de arco do RTDS, conforme apresentado anteriormente.

No presente estudo a falta foi aplicada 4,5 ms após o cruzamento por zero do ciclo positivo da tensão no local da falta. O ponto de falta foi variado ao longo da linha e a falta foi aplicada nos seguintes pontos: 5%, 25%, 50%, 75% e 98% do terminal emissor.

Os gráficos plotados para ambos os testes são referentes ao teste 60 Aef e o ponto de aplicação da falta em 50% da linha protegida. Os demais resultados são apresentados na tabela V. Também é apresentada a oscilografia do relé 421 com os pulsos de proteção, religamento ou bloqueio. Para a compreensão dos bits da oscilografia tem-se:

52AA1,52AB1,52AC1-Bit dos disjuntores A, B, C.

OUT101, OUT102, OUT103-Bits do trip das fases A, B, C.

OUT104-Bit de Religamento da fase sob Falta.

IN107-Bit do pulso gerado de religamento pelo valor baixo do THD do medidor de grandezas.

IN106-Bit do pulso gerado de bloqueio pelo valor baixo do THD do medidor de grandezas.

Vale destacar que o sistema analisado foi considerado sem sem nenhuma perturbação ou desbalanço que ocasionasse distorção harmônica. A influência da pré-existência de harmônicos no sistema está sendo avaliada e será apresentada em trabalhos futuros.

A. Testes Utilizando o Religamento Tradicional

Nos casos com o religamento tradicional, apesar do religamento ser comandado pelo relé, foi feita a medição do THD e foi gerado o sinal de trip do método proposto, porém estas informações não foram utilizadas. Desta forma é possível acompanhar o que a proteção inteligente iria fazer se estivesse ativa.

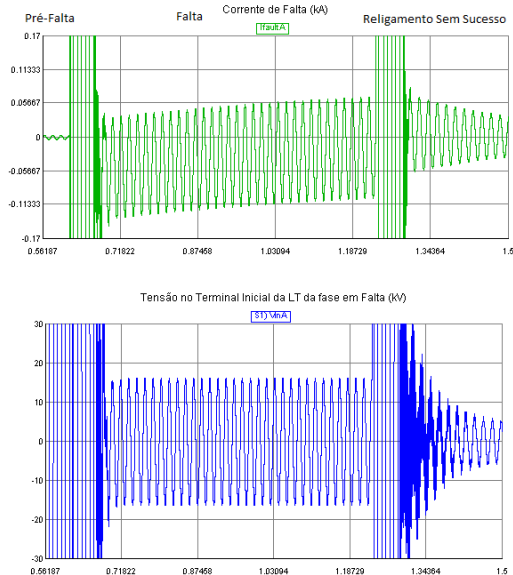


Figura 3. Corrente de falta e tensão da fase sob falta para falta permanente.

1) Falta Permanente: nas figuras 3 e 4 são apresentados os resultados dos testes com o método tradicional. O relé reconhece a falta e gera abertura monopolar. Como a falta é permanente a forma de onda de tensão no terminal emissor da fase em falta (3) é puramente senoidal após o transitório inicial. Pode-se acompanhar a medição da distorção harmônica desta tensão que é bem próxima de zero, gerando o pulso fictício de bloqueio (IN106, 4). Este pulso não atua no sistema e depois de decorrido o tempo morto (500 ms) é aplicado o religamento monopolar sob a falta permanente, acarretando em severas

perturbações ao sistema. Pode-se observar a subsequente abertura tripolar da linha comandada pelo relé, figura 4.

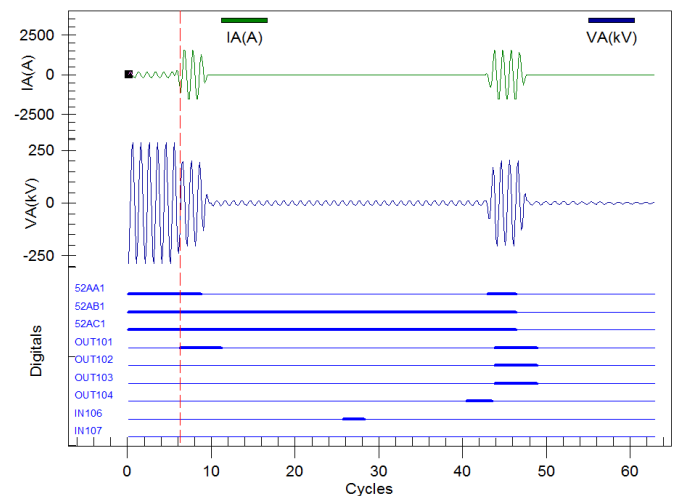


Figura 4. Oscilografia do relé para falta permanente usando o método tradicional.

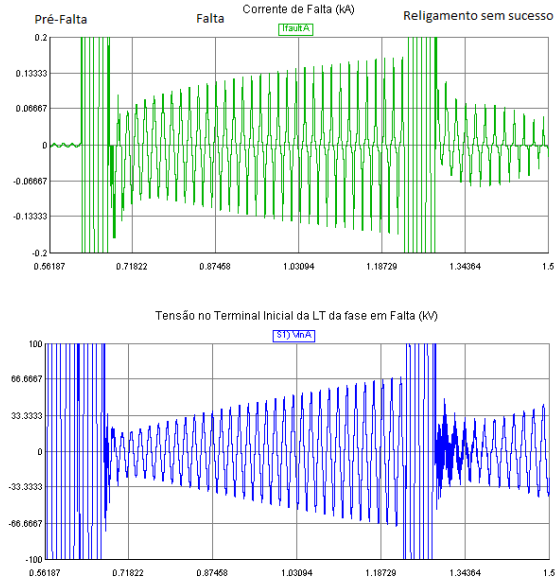


Figura 5. Corrente de falta e tensão da fase sob falta para falta transitória.

2) Falta Transitória: Nas figuras 5 e 6 são apresentados os resultados do teste utilizando o religamento monopolar tradicional. Depois de decorrido o tempo morto fixo estabelecido é aplicado o religamento. Como o tempo morto adotado é de 500 ms e a falta foi mais longa, a manobra não teve sucesso, ocasionando o religamento sob falta, acarretando novamente na atuação da proteção, provocando a abertura tripolar e bloqueando o religamento automático. Pode-se acompanhar o sinal de trip fictício (IN107, 6) que não é gerado, pois o arco secundário não se extinguiu. Neste caso, além de prejudicar o sistema devido à severidade de religar o sistema sobre a falta, não foi possível se beneficiar da manobra monopolar para a falta transitória, que iria se extinguir naturalmente se o tempo morto pudesse ser controlado, impossibilitando o sucesso da manobra.

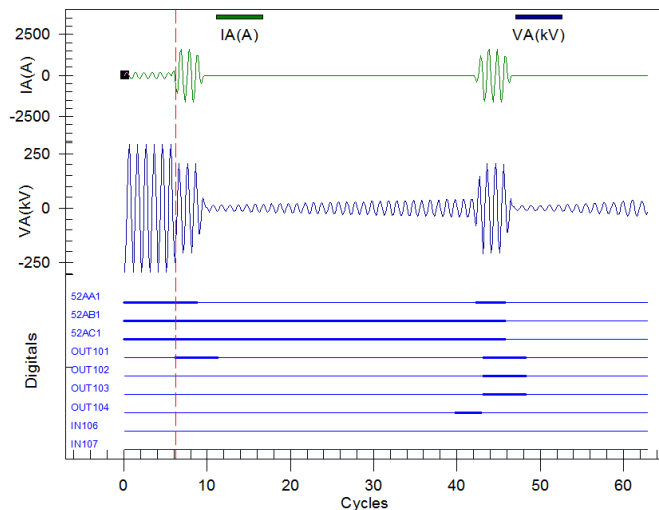


Figura 6. Oscilografia do relé para falta transitória usando o método tradicional.

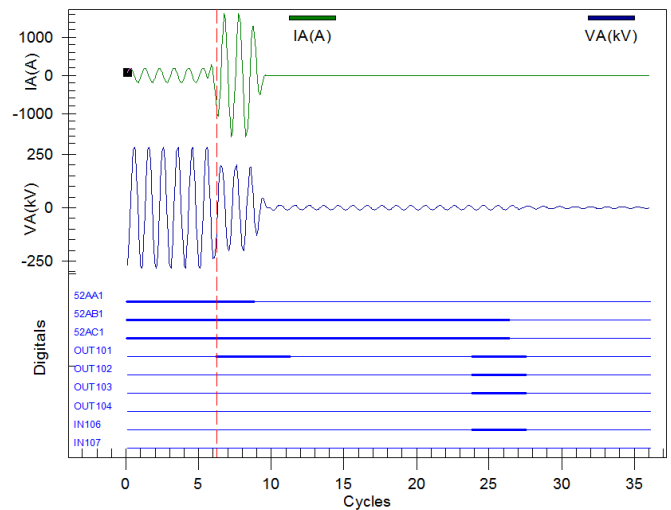


Figura 8. Oscilografia do relé para falta permanente usando o método proposto.

B. Testes Utilizando o Medidor de Grandezas SEL-735

1) Falta Permanente: Nas figuras 7 e 8 são apresentados os resultados do teste com o método proposto para falta permanente utilizando o medidor de grandezas. Pode-se observar que foi realizado o bloqueio do religamento monopolar e liberada a abertura tripolar ao se identificar que a falta era permanente. A classificação do tipo de falta (IN106,8) ocorre em torno de 300 ms ou 18 ciclos após a aplicação da falta, como pode ser visto na figura 8.

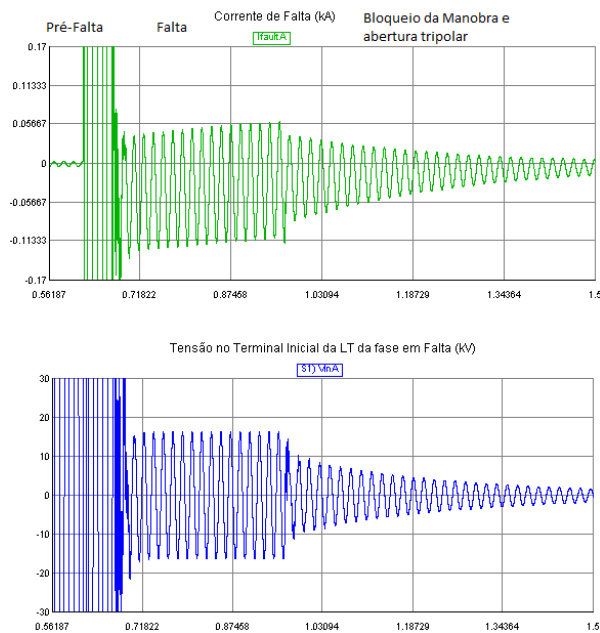


Figura 7. Corrente de falta e tensão da fase sob falta para falta permanente.

2) Falta Transitória: Nas figuras 9 e 10 são apresentados os resultados do teste com o método proposto para falta transitória. O relé reconhece a falta e gera abertura monopolar e como a falta é transitória a forma de onda de tensão no terminal emissor da fase sob falta (9) é bastante distorcida. Como consequência, a taxa de distorção harmônica permanece alta até a extinção da falta. A detecção da extinção da falta é feita, gerando o pulso de religamento (IN107, 10). O relé envia ordem para religamento da fase e o sistema volta a operar normalmente. O reconhecimento da extinção da falta se dá em torno de 215 ms após a extinção da falta.

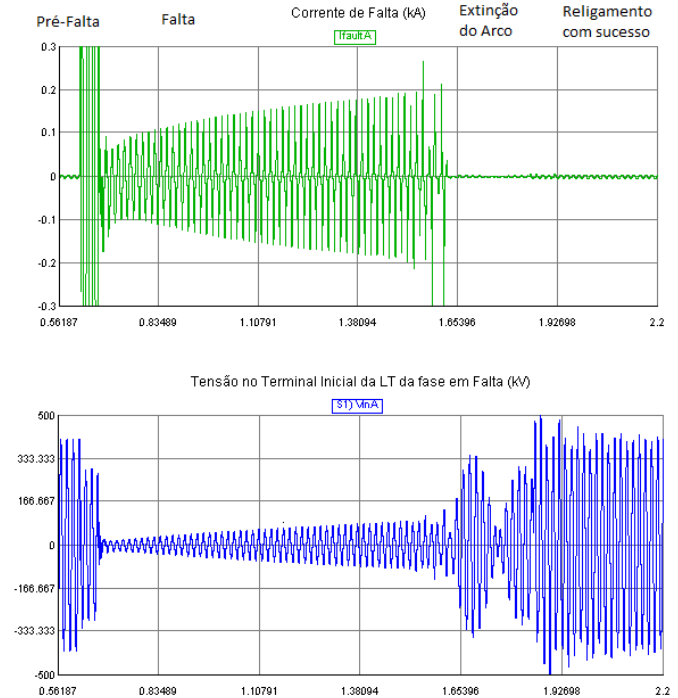


Figura 9. Corrente de falta e tensão da fase sob falta para falta transitória

Na tabela V são apresentados os tempos de atuação da proteção com o esquema proposto. Nos casos simulados foram

variados o local de aplicação do defeito e a corrente de arco secundário, conforme descrito anteriormente.

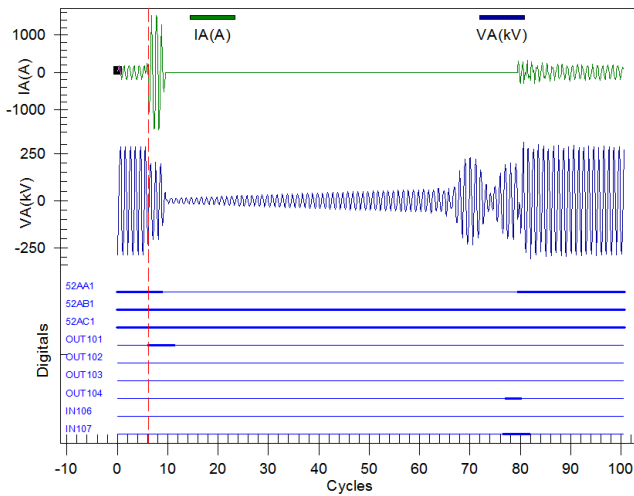


Figura 10. Oscilografia do relé para falta transitória usando o método proposto.

O esquema proposto teve um excelente desempenho, tanto para faltas próximas do relé quanto para faltas mais afastadas. O religamento também operou corretamente para diferentes níveis de corrente de arco secundário. O medidor de qualidade conseguiu medir o THD adequadamente independente da fonte de harmônico estar mais afastada do local de medição. Para faltas permanentes o tempo de atuação do esquema ocorreu entre 290 a 315 ms após a abertura monopolar do disjuntor da fase em falta. Já para faltas transitórias o tempo de identificação da extinção da falta ficou entre 210 a 340 ms após a extinção da corrente de arco secundário.

Tabela V. TESTES USANDO O ESQUEMA PROPOSTO.

Tipo de falta	Local de aplicação da falta (%)	Tempo de extinção (ms)		
		15 Aef	15 Aef compensado	60 Aef
Permanente	5	312,5	305	293,3
	25	313	307	293
	50	312,5	306	293,8
	75	310	305,4	293,5
	98	312	303,7	291
Transitória	5	338	247,7	213,5
	25	336	248,9	214
	50	337,5	248	215
	75	337	247,2	213,2
	98	339	247,7	213,8

VII. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi descrito um esquema de religamento monopolar adaptativo rápido baseado na medição do conteúdo harmônico de tensão da fase aberta. As simulações foram realizadas no RTDS e a manobra de abertura e religamento foi comandada pelo relé de distância SEL 421. O método adaptativo foi desenvolvido utilizando o medidor de qualidade SEL 735. O método proposto foi implementado assim como o religamento tradicional com tempo morto fixo. Foram simulados dois casos base: o primeiro de aplicação de falta permanente e o segundo de falta transitória longa,

especificamente com tempo de extinção do arco superior ao tempo morto de 500 ms. Utilizando o religamento tradicional os testes realizados não obtiveram sucesso devido à duração da falta ser superior ao tempo morto nos casos de falta transitória.

Para os casos de falta permanente, como no método tradicional não há nenhum tipo de classificação da falta, ocorreu o religamento sobre a falta, sucedido pela abertura tripolar, acarretando em perturbações severas para o sistema analisado. Os casos com o método proposto tiveram sucesso tanto para falta permanente, para o qual a proteção bloqueou o religamento automático e gerou abertura tripolar dos disjuntores da linha de transmissão protegida, quanto para falta transitória, no qual a proteção detectou o instante de extinção da corrente de falta e aplicou o religamento monopolar. O desempenho não variou com a localização do defeito ou a amplitude da corrente de arco secundário.

REFERENCES

- [1] E.W. Kimbark, "Selective-pole switching of long double-circuit EHV line", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 95, pp.219-230,1976.
- [2] A.J. Gonzales, G.C. Kung, C. Raczowski, C.W. Tylor, and D. Thonn, "Effects of single and three pole switching and high speed reclosing on turbine generator shafts and blades", IEEE Trans. Power App. Syst., vol.Pas-103, no. 11, pp.3218-3228, 1984.
- [3] D.S. Fitton, R.W. Dunn, R.K. Aggarwal, A.T. Johns, and A. Bennett, "Design and implementation of an adaptive single pole autoreclosure technique for transmission lines using artificial neural networks", IEEE Trans. Power Del., vol.11, no. 2, pp.748-756, 1996.
- [4] M.R. D. Dadash Zadeh and R. Rubeena, "Communication-Aided High-Speed Adaptive Single-Phase Reclosing", IEEE Trans. Power Del., vol.28, no. 1, pp.499-506, 2013.
- [5] F.D. Zahlay and K.S. Rama Rao, "Neuro-Prony and Taguchi's Methodology-Based Adaptive Autoreclosure Scheme for Electric Transmission Systems", IEEE Trans. Power Del., vol.27, no. 2, pp.575-582, 2012.
- [6] A. Montanari, M.C. Tavares and C. Portela, "Adaptive single-phase autoreclosing based on secondary arc voltage harmonic signature". In Proc. 2009 International Conference on Power Systems Transients (IPST), Kyoto, Japan, 2-6 June, 2009.
- [7] Z.M. Radojevic and J.R. Shin, "New algorithm for adaptive reclosing based on the calculation of the faulted phase voltage total harmonic distortion factor", IEEE Trans. Power Del., vol.16, no. 4, pp.676-686, 2001.
- [8] R. Luxenburger and P. Schegner, "Determination of secondary arc extinction time and characterization of fault conditions of single-phase autoreclosures". In Proc. 2005 International Conference on Future Power Systems, Amsterdam, Netherlands. pp.1-5, 2005.
- [9] M. Sanaye-Pasand and A. Kadivar, "Design of an online adaptive autoreclose algorithm for HV transmission lines". In IEEE International Power India Conference, Nova Delhi, India, 2006.
- [10] M.C. Tavares, J.L. Talaisys, A. Camara, "Voltage harmonic content of long artificially generated electrical arc in out-door experiment at 500 kV towers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.21, no. 3, June,2014, pp. 1005-1014.
- [11] A.S.B. Câmara, R.A.A. Gonçalves, M.G. Rodrigues, O.F. Oliveira, C.M. Portela, M.C. Tavares, "Single-phase auto-reclosure studies: secondary arc model research including a 500 kV line experimental circuit". In International Conference on High Voltage Engineering and Application, ICHVE 2008, pp.490-493, Chongqing, China, 9-12 Nov. 2008.
- [12] Manual de Instrução do Relé SEL-421. Disponível em: <http://www.selinc.com>.
- [13] Manual de instrução do medidor de grandezas SEL-735. Disponível em: <http://www.selinc.com>.
- [14] A.T. Johns, et.al., "Improved techniques for modelling fault arcs on faulted EHV transmission systems", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol.141, no.2, March 1994.
- [15] M. Kizilcay, T. Pinok, "Digital simulation of fault arcs in power systems". European Transactions on Electrical Power Engineering/ETEP Vol.1 , no.1, pp. 55-60, Jan/Feb,1991.