

Respostas de Diferentes Protocolos para Detecção de VMTs e Medição de Seus Parâmetros Característicos

N. M. Matsuo; N. Kagan ; S. X. Duarte; E. L. Ferrari - Enerq/USP
A. Tenório; J. L. Cavaretti - Eletropaulo; U. F. Castellano

Resumo-Este artigo apresenta um estudo de avaliação de protocolos de medição de variações momentâneas de tensão (VMTs). A avaliação das possíveis diferenças na magnitude e na duração de VMTs produzidas por diferentes protocolos é de grande importância, pois os índices de desempenho de sistemas elétricos quanto às VMTs são obtidos na prática a partir de dados obtidos por instrumentos de medição. O estudo fez uso de um simulador digital, gerando condições de tensão resultantes de faltas em um sistema elétrico. Diversos protocolos de medição de valores eficazes foram aplicados, comparando-se os resultados.

Palavras chave: variações momentâneas de tensão; afundamento de tensão; qualidade de energia; protocolo de medição; indicador de desempenho

I. INTRODUÇÃO

O desempenho dos sistemas elétricos em relação a variações momentâneas de tensão (VMTs) é medido por meio de índices levantados através de medições, utilizando instrumentos que detetam os eventos e medem as grandezas associadas ao fenômeno. Tendo em vista a existência de diferentes instrumentos no mercado, para esta finalidade, é de grande importância avaliar as possíveis diferenças nos resultados, obtidos por diferentes instrumentos, pois não há, ainda, uma padronização definitiva de protocolo de medição. Este artigo apresenta o estudo de avaliação de protocolos para VMTs, realizado dentro do Projeto de Qualidade de Energia desenvolvido pela Universidade de S. Paulo e Eletropaulo.

II. METODOLOGIA

A. Grandezas e Parâmetros de Caracterização de VMTs

As VMTs são medidas normalmente em termos do valor eficaz de tensão [1,2], sendo os parâmetros de caracterização mais usados a magnitude e a duração. Convencionalmente, a magnitude de uma VMT é caracterizada pelo menor valor eficaz obtido durante o evento (tensão remanescente ou, alternativamente, variação de tensão) e a sua duração é o intervalo de tempo decorrido desde o instante em que o valor eficaz ultrapassa o valor adotado como limiar (usualmente 90% e 110% da tensão nominal do sistema, respectivamente para afundamento e elevação) até o instante em que o mesmo retorna ao nível normal.

B. Valor Eficaz

Medidores digitais geralmente computam o valor eficaz a partir de amostras de valores instantâneos, tomando uma janela de tempo que considera a periodicidade do sinal em regime permanente.

O procedimento de cálculo pode diferir entre um instrumento e outro em termos de taxa de amostragem, janela de integração, periodicidade do cálculo do valor eficaz, início da integração e fórmula de cálculo. A expressão mais simples, onde N é o número de amostras, na janela, é dada por:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N V_k^2}{N}}$$

Em princípio é possível utilizar janelas desde $\frac{1}{2}$ ciclo da frequência da rede até um múltiplo qualquer de $\frac{1}{2}$ ciclo, mas é mais comum, em instrumentos para medição de VMTs atualmente existentes, a utilização de janela de $\frac{1}{2}$ ciclo ou de 1 ciclo.

Os cálculos podem ser efetuados a cada nova amostra (atualização “contínua”), mas é comum efetuar atualizações a cada ciclo ou a cada $\frac{1}{2}$ ciclo (atualização “discreta”).

C. Detecção e Medição

O valor eficaz está sujeito a efeitos inerentes ao cálculo dessa grandeza, entre eles o atraso na resposta à variação de tensão de um regime para outro.

A figura 1 mostra um exemplo de cálculo de valor eficaz de tensão durante uma perturbação de curta duração, em que a amplitude varia de 1.0 pu a 0.5 pu, ilustrando como os resultados de três protocolos que utilizam tamanhos de janela diferentes podem diferir entre si. A forma de atualização é contínua.

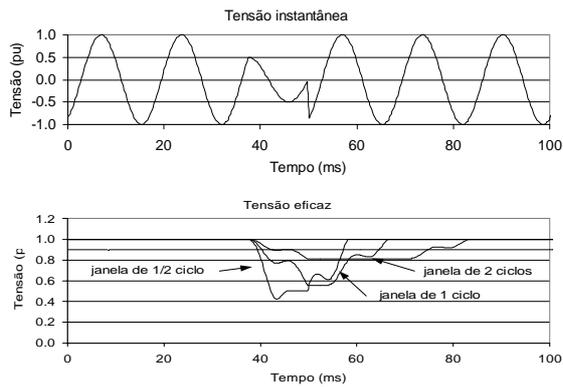


Figura 1 - Exemplo mostrando as diferenças entre valores eficazes com janelas diferentes

III. SIMULAÇÕES

Foram realizadas avaliações com 8 protocolos de cálculo do valor eficaz, utilizando um simulador digital, visando avaliar as diferenças nos resultados e o estabelecimento de um protocolo mínimo a ser usado para a obtenção de índices de desempenho de sistemas elétricos. Duas baterias de simulações foram realizadas (10000 casos para cada situação, mudando os parâmetros). Foram examinados os protocolos descritos na tabela 1.

Tabela 1 - Protocolos de medição de VMT avaliados

Protocolo	Tamanho da janela	Intervalo de tempo de cálculo do valor eficaz	Instante inicial das janelas
A	1 ciclo	a cada amostra	deslocado a cada amostra
B	1 ciclo	1 ciclo	aleatório
C	1 ciclo	1 ciclo	zero da tensão de uma fase
D	1 ciclo	½ ciclo	aleatório
E	½ ciclo	a cada amostra	deslocado a cada amostra
F	½ ciclo	½ ciclo	aleatório
G	2 ciclos	a cada amostra	deslocado a cada amostra
H	2 ciclos	2 ciclos	aleatório

A. Bateria de Simulações 1

Essa bateria consistiu em simulações de faltas fase-terra e fase-fase ao longo de um alimentador primário de distribuição de 10 km de comprimento, calculando as tensões (fase-terra e fase-fase) no alimentador primário, no ponto de avaliação, e no secundário de um transformador de distribuição (com ligação delta-estrela) conectado a esse ponto, sendo sorteados os seguintes parâmetros: distância do ponto de falta; instante de ocorrência da falta no período da

tensão senoidal e tempo de atuação do dispositivo de proteção, variado dentro da faixa de ½ ciclo a 6 ciclos. Para o ponto de avaliação foram considerados 2 casos: avaliação no alimentador, sorteando a distância desse ponto, e avaliação no barramento da subestação.

São avaliadas as diferenças (desvios) entre os valores dos parâmetros de VMTs (magnitude e duração) obtidos usando um determinado protocolo de cálculo e os valores observados na tensão alternada durante as perturbações. Desvio de magnitude é a diferença entre o valor eficaz mínimo da tensão remanescente (em pu da tensão eficaz normal) e o valor da amplitude da tensão alternada durante a perturbação (em pu da amplitude da tensão normal).

B. Bateria de Simulações 2

Foram sorteados alguns parâmetros principais (amplitude da tensão e deslocamento de ângulo de fase da tensão durante a ocorrência de afundamento, e duração), considerando:

- 90% dos ângulos de defasagens estão linearmente distribuídos entre 0° e 30° . Os outros 10% estão linearmente distribuídos entre 30° e 60° .
- 20% das amplitudes de afundamentos estão linearmente distribuídas entre 0% e 50%. As demais 80% estão distribuídas entre 50% e 90%.

C. Resultados da Bateria de Simulações 1

a) Resultados em Função do Tamanho da Janela

As tabelas 2 e 3 apresentam resultados para faltas fase-terra considerando diferentes tamanhos de janela, com cálculo do valor eficaz a cada amostra (protocolos E, A e G, respectivamente para janelas de ½ ciclo, 1 ciclo e 2 ciclos).

Verifica-se que as janelas de ½ ciclo e 1 ciclo apresentam probabilidades muito baixas de terem desvios positivos significativos na magnitude. Por outro lado, a janela de 2 ciclos apresenta possibilidade de grandes desvios. Quanto aos desvios negativos, há uma tendência de maior incidência de desvios maiores quando se usam janelas menores. Mas valores mais significativos ocorrem apenas com faltas fase-fase, o que pode ser atribuído aos deslocamentos angulares de tensão mais pronunciados nesse tipo de falta do que na falta fase-terra. Em termos de duração, verifica-se que os valores correspondentes à probabilidade 5% de ser ultrapassado observados nos resultados são menores do que o tamanho da janela.

Tabela 2 - Faltas fase-terra. Avaliação no alimentador primário.
Valores correspondentes às frequências acumuladas especificadas em % da tensão nominal

	Frequência acumulada	Relativo à tensão fase-terra no primário			Relativo à tensão fase-fase no primário			Relativo à tensão fase-terra no secundário			Relativo à tensão fase-fase no secundário		
		½ ciclo	1 ciclo	2 ciclos	½ ciclo	1 ciclo	2 ciclos	½ ciclo	1 ciclo	2 ciclos	½ ciclo	1 ciclo	2 ciclos
Diferenças nas magnitudes (% de Vn)	5%	-1.0	-0.9	-0.9	-1.6	-1.0	-0.9	-1.0	-0.9	-0.9	-1.6	-1.0	-0.9
	50%	-0.5	-0.5	-0.4	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.6	-0.5	-0.4
	95%	-0.1	0.0	46.8	-0.1	0.0	12.6	-0.1	0.0	19.7	-0.1	0.0	12.6
Diferenças nas durações (ms)	5%	0.5	2.2	5.1	-5.1	-6.7	-14.8	-4.2	-4.3	-8.7	-5.1	-6.7	-14.8
	50%	4.4	6.9	17.9	2.0	2.0	5.8	2.5	3.9	11.8	2.0	2.0	5.8
	95%	7.4	10.6	21.7	5.4	8.2	14.0	5.6	8.6	17.8	5.4	8.2	14.0

Tabela 3 - Faltas fase-terra. Avaliação no barramento da subestação
Valores correspondentes às frequências acumuladas especificadas em % da tensão nominal

	Frequência acumulada	Relativo à tensão fase-terra no primário			Relativo à tensão fase-fase no primário			Relativo à tensão fase-terra no secundário			Relativo à tensão fase-fase no secundário		
		½ ciclo	1 ciclo	2 ciclos	½ ciclo	1 ciclo	2 ciclos	½ ciclo	1 ciclo	2 ciclos	½ ciclo	1 ciclo	2 ciclos
Diferenças nas Magnitudes (% de Vn)	5%	-1.0	-0.9	-0.9	-1.0	-1.0	-0.9	-1.0	-1.0	-0.9	-1.0	-0.9	-0.9
	50%	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4
	95%	-0.1	0.0	16.4	-0.1	0.0	7.2	-0.1	0.0	7.2	-0.1	0.0	9.1
Diferenças nas durações (ms)	5%	-5.3	-5.5	-11.8	-7.7	-15.5	-30.5	-7.7	-15.5	-30.5	-7.6	-15.3	-29.8
	50%	0.9	2.0	4.6	-1.3	-3.5	-5.3	-1.3	-3.5	-5.3	-2.8	-2.5	-3.5
	95%	5.9	9.4	19.8	4.7	7.9	13.5	4.7	7.9	13.5	4.8	8.0	17.2

b) Protocolos com Cálculo do Valor Eficaz a Intervalos Espaçados

As avaliações com os protocolos que não efetuam cálculo do valor eficaz a cada amostra mostraram que, para cada janela considerada:

- os desvios positivos na magnitude tendem a aumentar com o cálculo espaçado,
- os desvios negativos na magnitude tendem a diminuir com o cálculo espaçado, e
- os desvios na duração tendem a aumentar com aumento do intervalo de atualização

c) Sub-avaliação das Magnitudes de Afundamentos

A figura 2 ilustra uma avaliação das porcentagens dos casos de afundamentos em que a magnitude (tensão remanescente) seria classificada numa faixa superior em relação àquela em que seria se a amplitude da tensão alternada durante o evento fosse considerada. Por exemplo, nos casos de afundamentos que ficariam na faixa de 70 a 85% da tensão normal, o protocolo G (de janela de 2 ciclos) levaria a classificação de cerca de 10% desses eventos numa faixa superior. Comparações entre os resultados dos protocolos B e C indicam que o instante do início da janela (aleatório ou sincronizado com a passagem de tensão de uma das fases por zero) tem, estatisticamente, pouca influência nos resultados dos protocolos com janela de 1 ciclo.

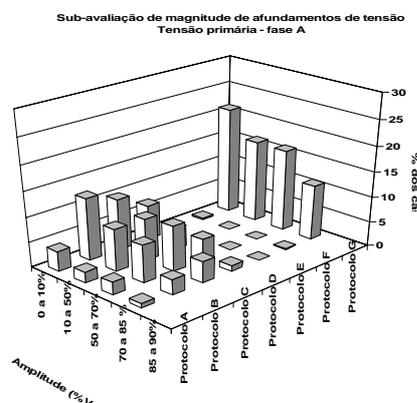


Figura 2 - Porcentagens de casos com desvio na classificação de magnitude dos afundamentos. Falta Fase-terra – Tensão Primária (MT)

D. Resultados da Bateria de Simulações 2

Nessas simulações foram considerados os protocolos A, F, D e B, obtendo-se as distribuições de frequência acumulada de magnitudes e durações. Com base na análise dos resultados podemos concluir que:

- os desvios na duração não são preocupantes principalmente se considerarmos a discretização das durações normalmente utilizada na forma de apresentação de índices, pois em geral os desvios de

duração geralmente não ultrapassam o tamanho da janela.

- 95% dos desvios negativos de magnitude apresentam valores absolutos inferiores a 2.5% no pior caso (protocolo B).
- Os desvios positivos de magnitudes chegam a valores absolutos maiores do que os negativos, sendo que, no pior caso (protocolo B), 95% dos casos apresentam valores inferiores a 15%.

E. Teste de Detecção

Foram realizadas simulações adicionais para avaliar a taxa de falha de detecção de afundamentos, considerando os protocolos A, F, D, B e H.

O protocolo H apresentou uma elevada taxa de falha de detecção, de 20% na faixa de tensão de 80 a 89% e de 6% na faixa de 70 a 79%. Nos demais protocolos examinados, a maior taxa de falha de detecção é observada com o protocolo B, sendo de cerca de 7% na faixa de amplitudes entre 80% e 89%, podendo ser considerada aceitável. Os outros protocolos examinados fornecem taxas de falhas de detecção menores.

IV. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

As simulações realizadas permitiram uma avaliação de diferentes protocolos de medição de VMTs, mostrando que os valores de magnitude e duração e, conseqüentemente os índices de ocorrência de VMTs, são afetados pelo protocolo usado em instrumentos de medição. Os principais fatores que afetam os resultados são o tamanho da janela e intervalo de cálculo do valor eficaz, mas eles são dependentes também das características das VMTs.

Recomenda-se que o uso de janelas de 2 ciclos seja limitado a casos em que o principal interesse é avaliar VMTs de durações mais longas do que as consideradas neste estudo, superiores a 3 ou 4 ciclos. As janelas de ½ e 1 ciclo são mais adequadas para as medições de VMTs.

Considerando os protocolos com janelas de ½ e 1 ciclo, podemos observar que as diferenças nas durações resultantes são de menor importância, principalmente se considerarmos a discretização das durações normalmente utilizada na forma de apresentação de índices, pois em geral os desvios de duração não ultrapassam o tamanho da janela.

Quanto à análise das diferenças de magnitude, os desvios positivos aumentam com o tamanho da janela e com o espaçamento do intervalo de tempo de cálculo do valor eficaz e os desvios negativos tendem a aumentar de forma oposta. Dos resultados das simulações, em que foram admitidas determinadas distribuições de probabilidade de magnitude e defasagem angular dos eventos de VMTs, verifica-se que o algoritmo que utiliza janela de um ciclo com cálculo do valor eficaz a cada ciclo (protocolo B) apresenta desvios positivos de magnitude inferiores a 0.15 pu em 95% dos casos e taxa esperada de falha de detecção inferior a 5%. Esse desempenho pode ser considerado aceitável, uma vez que as distribuições de probabilidade das características de VMTs utilizadas são provavelmente conservativas. Os desvios negativos na magnitude são menos preocupantes do ponto de vista estatístico. Julga-se que o protocolo com janela de um ciclo com cálculo do valor eficaz a cada ciclo possa ser indicado como o protocolo mínimo para levantamentos de índices de VMTs de sistemas elétricos.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEC 1000-2-1 1990-05 – Electromagnetic compatibility (ECM) – Part 2: Environment – Section 1: Description of the environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems
- [2] IEEE Std. 1159-1995 – IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power