



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GAT/05
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO -IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

**IMPEDÂNCIAS DO SISTEMA REALMENTE AFETAM AS OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA?
APLICANDO ELEMENTOS DE PROTEÇÃO DE OSCILAÇÃO DE POTÊNCIA SEM ESTUDOS COMPLEXOS**

**Normann Fischer, Gabriel Benmouyal, Daqing Hou, Demetrios Tziouvaras,
John Byrne-Finley e Brian Smyth
SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES**

RESUMO

Uma das técnicas tradicionais para detecção de oscilações de potência usa uma característica dual-quadrilateral baseada na medição do intervalo de tempo que a impedância de sequência-positiva leva para cruzar dois blinders. Outra técnica monitora a variação da aproximação da tensão no centro da oscilação. Este artigo apresenta uma comparação do desempenho de aplicações dessas duas técnicas em casos derivados de uma simulação de transitórios do sistema usado como exemplo e em casos registrados durante operações reais no campo.

PALAVRAS-CHAVE

Oscilação de Potência, OOS, estabilidade

1.0 - INTRODUÇÃO

Uma oscilação de potência consiste num fenômeno do sistema observado quando o ângulo de fase de uma fonte de potência começa a variar no tempo em relação a outra fonte do mesmo sistema. O fenômeno geralmente ocorre logo após uma perturbação de grande porte, como uma falta, que altera o equilíbrio mecânico de uma ou mais máquinas. Uma oscilação de potência é estável quando, logo após uma perturbação, a velocidade de rotação de todas as máquinas retorna à velocidade síncrona. Uma oscilação de potência é instável quando, logo após uma perturbação, uma ou mais máquinas não retornam à velocidade síncrona, perdendo assim o sincronismo com o resto do sistema.

2.0 - MÉTODOS DE DETECÇÃO DE OSCILAÇÃO DE POTÊNCIA

2.1 A técnica dual-quadrilateral (Método A)

A técnica dual-quadrilateral para detecção de oscilações de potência usa a taxa de variação da impedância $Z1$. Ela é baseada no princípio de que a variação da impedância $Z1$ é gradual durante uma oscilação de potência devido às inércias dos geradores do sistema, enquanto durante uma falta ocorre uma mudança em degrau com uma constante de tempo curto.

Ambas as faltas e as oscilações de potência podem fazer com que a impedância $Z1$ entre na característica de operação de um elemento de distância. A medição da impedância apenas pelo elemento de distância não pode ser usada para distinguir uma oscilação de potência de uma falta. O método dual-quadrilateral discrimina entre faltas e oscilações de potência através do cálculo da taxa de variação da impedância $Z1$. A Fig. 1 mostra a característica baseada na impedância dual-quadrilateral usada para detecção de oscilações de potência em um sistema de potência.

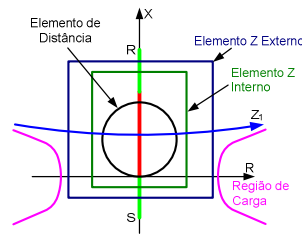


FIGURA 1 – Característica de detecção de oscilações de potência baseada na impedância quadrilateral

A implementação real da medição da taxa de variação da impedância Z_1 é tipicamente executada medindo-se o tempo que a impedância Z_1 leva para atravessar a característica dos elementos dual-quadrilateral. Um temporizador é iniciado quando a impedância Z_1 entra na característica externa (ver Fig. 1). Se a impedância Z_1 permanecer entre as características externa e interna durante a temporização ajustada, o elemento de bloqueio por oscilação de potência (“power-swing blocking” – PSB) opera e as zonas dos elementos de distância selecionados têm sua operação bloqueada por um período de tempo.

2.2 Tensão no centro da oscilação (Método B)

A tensão no centro da oscilação (“swing center voltage” – SCV) é definida como a tensão no local de um sistema equivalente de duas fontes, onde o valor da tensão é zero quando os ângulos entre as duas fontes estão defasados de 180 graus. A Fig. 2 ilustra o diagrama fasorial de tensão de um sistema geral de duas fontes, com a SCV mostrada como o fasor da origem para o ponto o' .

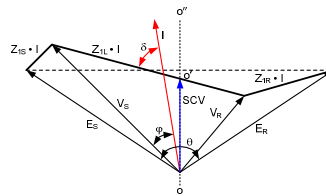


FIGURA 2 – Diagrama fasorial de tensão de um sistema de duas fontes

Quando um sistema de duas fontes perde a estabilidade e entra numa condição de perda de sincronismo (“out-of-step” – OOS), a diferença angular das duas fontes, $\theta(t)$, vai aumentar em função do tempo. Conforme deduzido em detalhes em [3], podemos representar a SCV através de (1), assumindo uma magnitude da fonte equivalente, E .

$$SCV(t) = \sqrt{2}E \sin\left(\omega t + \frac{\theta(t)}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\theta(t)}{2}\right) \quad (1)$$

$SCV(t)$ é a SCV instantânea que deve ser diferenciada da SCV estimada pelo relé. A Equação (1) é uma forma de onda senoidal com amplitude modulada típica. O primeiro termo senoidal é a onda senoidal base, ou a portadora, com uma frequência média de $\omega + (1/2)(d\theta/dt)$. O segundo termo é a modulação da amplitude do cosseno.

A Fig. 3 mostra uma SCV de sequência-positiva (SCV_1) para um sistema de potência com uma frequência nominal de 50 Hz e uma frequência de escorregamento constante de 5 Hz. Quando a frequência de uma entrada senoidal é diferente daquela assumida no seu cálculo fasorial, como é o caso de uma situação OOS, ocorrem oscilações na magnitude fasorial como resultado. No entanto, o cálculo da amplitude na Fig. 3 é regular porque a quantidade de sequência-positiva calcula efetivamente a média das oscilações da amplitude das fases individuais.

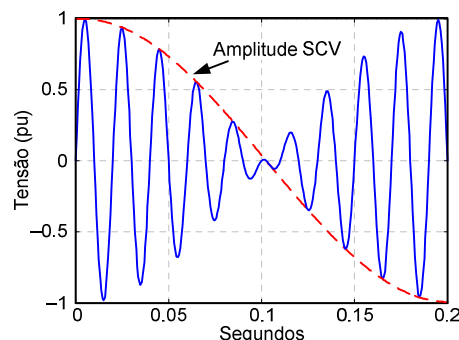


FIGURA 03 - SCV durante uma condição OOS

A magnitude da SCV varia entre 0 e 1 por unidade da tensão nominal do sistema. Com uma frequência de escorregamento de 5 Hz, a magnitude da tensão é forçada para 0 a cada 0,2 segundo. A Fig. 3 mostra a SCV

durante uma condição OOS do sistema. Durante condições de carga normal, a magnitude de SCV permanece constante.

3.0 - COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO A E O MÉTODO B

3.1 Exemplos de Simulação de Detecção de Oscilação de Potência Usando os Métodos A e B

Os dois métodos, dual-quadrilateral e SCV, operam de acordo com princípios diferentes, mas chegam, basicamente, ao mesmo resultado. Esta seção apresenta uma comparação dos dois métodos aplicados a um sistema de potência com duas fontes. O sistema de potência usado para a comparação consiste de duas fontes fortes ligadas através de uma linha de transmissão paralela (ver Fig. 4). O sistema de potência é construído em um ambiente RTDS. Os dados simulados são reproduzidos para um relé que tem o método PSB SCV ou dual-quadrilateral habilitado.

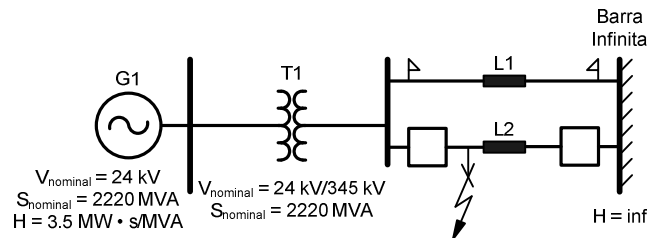


FIGURA 04 - Simulação do sistema de potência

Para criar a oscilação de potência, uma falta trifásica é simulada na Linha L2 perto da barra, mas é eliminada após um determinado tempo. A falta e o atraso na eliminação da falta causam a oscilação de potência e também determinam se a oscilação será estável ou instável. A oscilação de potência é monitorada na Linha L1 enquanto os disjuntores são abertos na Linha L2. O religamento é também implementado para fechar L2, restabelecendo o serviço em 1 segundo após os disjuntores serem abertos. O religamento não afeta a operação de detecção do PSB. Quando a linha previamente defeituosa tem o serviço restabelecido, a linha imediatamente recupera a carga, reduzindo assim a corrente de carga na linha sem defeito. Isso se apresenta como um aumento na impedância quando visto a partir da linha sem defeito. Contudo, sob o ponto de vista do sistema de potência, a impedância total é reduzida (as duas linhas estão agora novamente em paralelo) e a capacidade de transmissão de potência do sistema é aumentada, aumentando assim a estabilidade do gerador.

Para testar a operação de ambos os métodos de detecção do PSB, oscilações estáveis e instáveis são produzidas através da simulação. O gerador do modelo da simulação é equipado com ambos um regulador de tensão automático e um estabilizador do sistema de potência, mas para os casos aqui apresentados, ambos estão desligados.

Para uma oscilação de potência estável, a taxa de oscilação é de aproximadamente 1,2 Hz (ver Fig. 5). A impedância de sequência-positiva para a oscilação estável é mostrada na Fig. 8. No instante 100 ciclos, a L2 é religada. Quando a L2 é fechada, a corrente de L1 diminui porque L2 transporta metade da carga. Isso se apresenta como um aumento da impedância para o relé que monitora as correntes e tensões de L1.

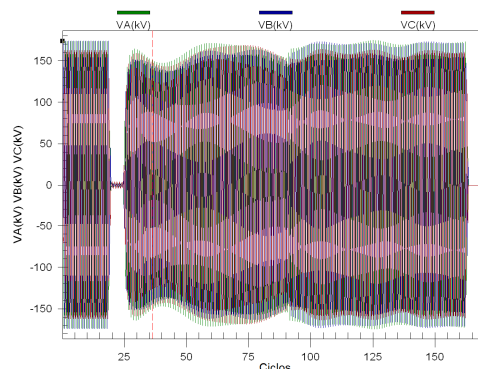


FIGURA 05 - Oscilação de potência estável

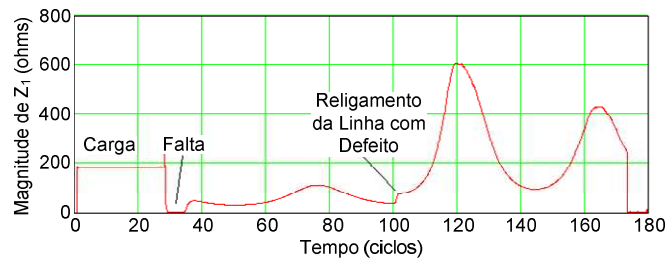


FIGURA 06 - Gráfico de impedâncias para a oscilação de potência estável

A oscilação instável é cerca de 4,5 Hz com uma taxa de oscilação crescente de até 8,5 Hz (ver Fig. 7). A impedância de sequência-positiva para a oscilação instável está plotada na Fig. 10. De forma similar à oscilação estável, o religamento ocorre em 100 ciclos, reduzindo a impedância do sistema e aumentando a capacidade de transmissão de potência. Ambos os casos de simulação são salvos no formato COMTRADE ("Common Format for Transient Data Exchange") e reproduzidos para o relé por meio de um equipamento de testes para verificação do desempenho da lógica PSB.

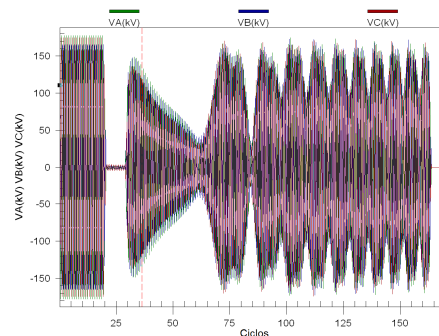


FIGURA 07. Oscilação de potência instável

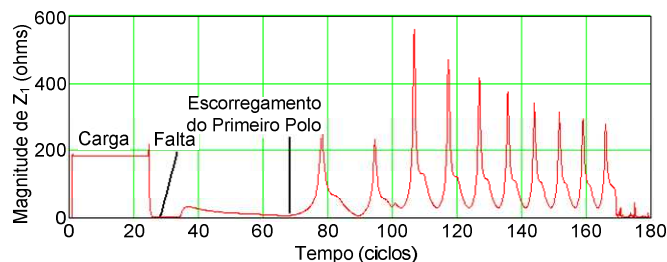


FIGURA 08 - Gráfico de impedâncias para a oscilação de potência instável

A técnica dual-quadrilateral pode exigir um estudo extenso do sistema de potência para calcular os ajustes do relé. Critérios como carga máxima, impedância total do sistema e a taxa de oscilação mais rápida possível precisam ser determinados para cada sistema.

O sistema é protegido por três elementos mho, onde as Zonas 1 e 2 são ajustadas na direção à frente e a Zona 3 é reversa. A Zona 1 é ajustada em 80% da impedância da linha ou 15,08 ohms, e a Zona 2 é ajustada em 120% da impedância da linha ou 22,62 ohms.

Os blinders interno e externo são selecionados com algumas observações. Primeiro, a carga tem que ser considerada. Se o blinder externo for ajustado com um valor muito alto e invadir a carga, a função PSB estará sujeita a operar durante condições de carga pesada. Em segundo lugar, o blinder interno tem que ser ajustado maior do que a Zona 1 e Zona 2 e possivelmente maior do que os elementos mho da Zona 4 que são supervisionados por um elemento PSB. Finalmente, os dois blinders têm que ser suficientemente separados para fornecer tempo suficiente para capturar a taxa de oscilação mais rápida determinada no estudo do sistema. A seleção das duas impedâncias para os blinders interno e externo para esta simulação atende a todos os três critérios (ver Fig. 09).

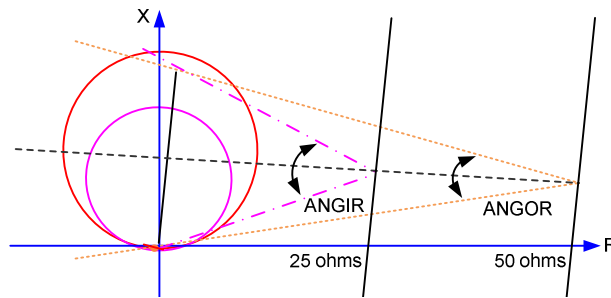


FIGURA 09. Cálculo dos ajustes do método dual-quadrilateral

A partir das equações de [6], o ângulo do raio interno, ANGIR, e o ângulo do raio externo, ANGOR, podem ser calculados. Para esta simulação, o raio interno e o raio externo são 41,33 graus e 21,36 graus, respectivamente. Em seguida, a temporização do PSB é calculada e verificada usando a equação de [6]. O tempo de bloqueio é normalmente ajustado de 1,5 a 2,5 ciclos para fornecer ao relé maior capacidade de detectar a diferença entre uma falta e uma condição OOS [6]. Para a simulação, a carga é muito grande e o elemento PSB pode tolerar um ajuste da ordem de subciclos para esta temporização. A simulação usa um tempo do PSB de 0,61 ciclo, ou 10 milissegundos, para detectar e bloquear para uma condição de oscilação instável que tenha uma taxa de aproximadamente 5,5 Hz. O tempo do PSB da ordem de subciclos foi selecionado apenas para efeito de demonstração. O relé tem um intervalo de processamento de 2 milissegundos. Isso permite cinco contagens para detectar a condição de oscilação de potência.

Não há nenhum ajuste associado ao método de variação de SCV; portanto, ele não requer quaisquer estudos do sistema de potência para ser aplicado corretamente.

A primeira simulação é uma oscilação de potência estável para o método dual-quadrilateral. A Fig. 10 mostra a oscilação de potência estável e os elementos PSB atuando quando a impedância atravessa os blinders interno e externo, X6ABC e X7ABC, respectivamente.

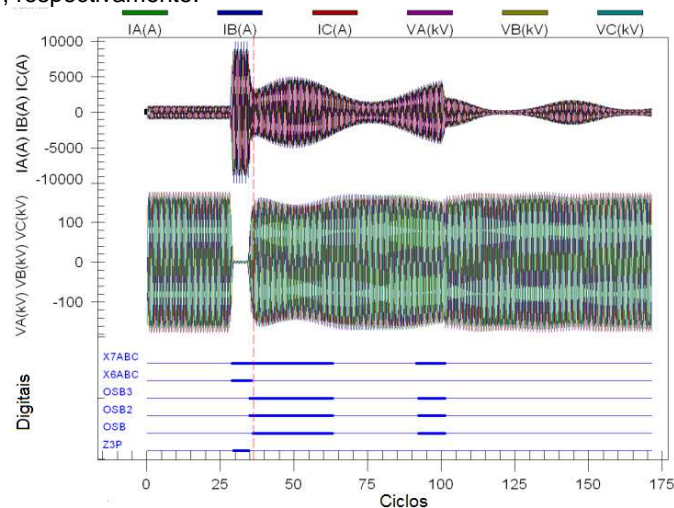


FIGURA 10 - Oscilação estável usando a técnica dual-quadrilateral

Os resultados da simulação para o método PSB SCV são mostrados na Fig. 11, Fig. 12 e Fig. 13. Ambas as técnicas detectam a condição de oscilação de potência e bloqueiam apropriadamente. O método SCV para detecção de uma oscilação de potência é mais lento do que o método dual-quadrilateral, conforme pode ser observado comparando a Fig. 10 com a Fig. 11. Ele é mais lento devido à taxa de variação lenta da SCV. Isso é confirmado em uma análise da Fig. 12.

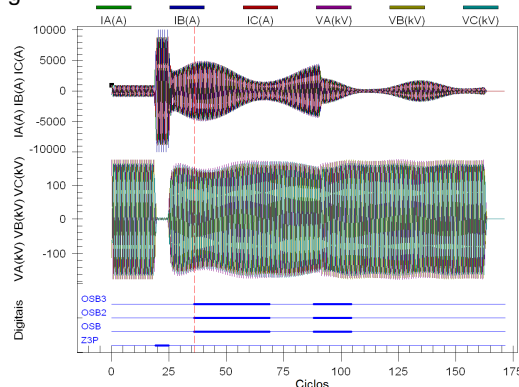


FIGURA 11 - Oscilação estável usando a técnica SCV

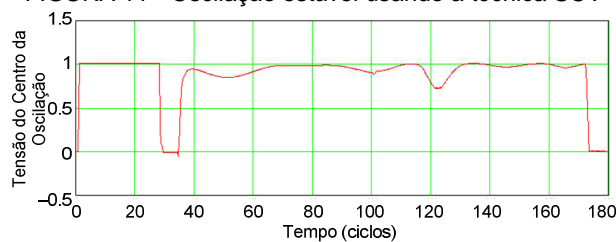


FIGURA 12 - Magnitude de SCV durante a oscilação estável

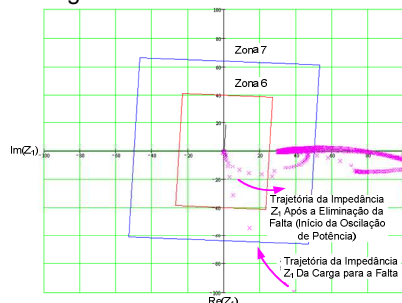


Fig. 13. Gráfico de impedâncias da condição de oscilação de potência estável

As simulações finais aplicam uma oscilação instável com uma taxa de oscilação inicial de 4,5 Hz e verificam se os dois métodos operam de forma similar. Como o sistema não foi configurado para trip por perda de sincronismo ("out-of-step tripping" – OST), a simulação foca na ativação dos elementos PSB. Os resultados da oscilação de potência instável usando a técnica dual-quadrilateral são mostrados na Fig. 14. A Fig. 15, Fig. 16 e a Fig.17 mostram os resultados da oscilação de potência instável usando o método SCV. Novamente, ambas as técnicas detectam a condição de oscilação de potência.

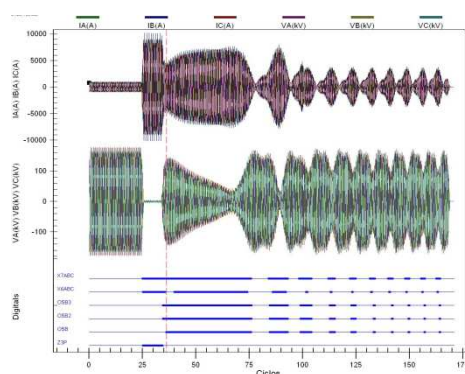


FIGURA 14 - Oscilação instável usando a técnica dual-quadrilateral

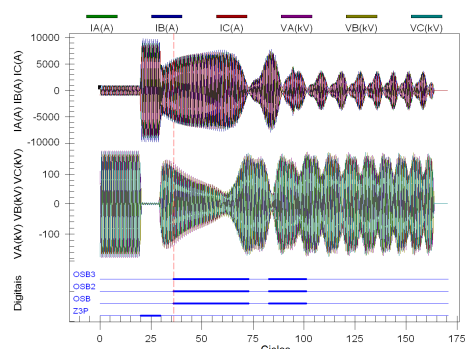


FIGURA 15 - Oscilação instável usando a técnica de variação de SCV

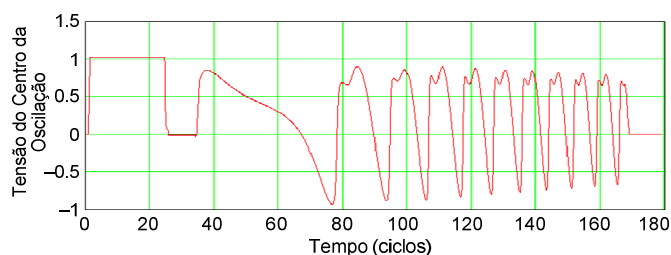


FIGURA 16 - Magnitude de SCV durante a oscilação instável

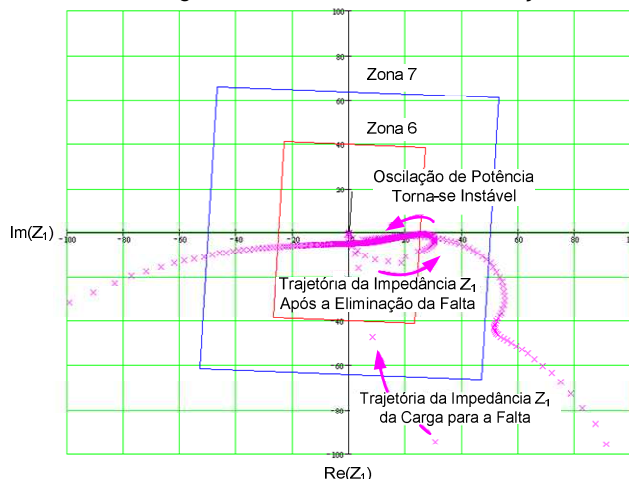


FIGURA 17 - Gráfico de impedâncias da condição de oscilação de potência instável

4.0 - CONCLUSÃO

Este artigo demonstra que dois métodos diferentes podem ser usados para detectar com sucesso uma condição de oscilação de potência em um sistema de potência logo após uma perturbação.

O primeiro desses métodos, o método dual-quadrilateral, requer um estudo extenso do sistema de potência com faltas aplicadas durante diferentes condições de operação. O usuário tem que analisar a trajetória da impedância Z_1 além da taxa na qual a impedância Z_1 atravessa o plano da impedância Z_1 . Usando esses dados, os parâmetros dos elementos quadrilaterais interno e externo são estabelecidos. A taxa (velocidade) na qual a impedância Z_1 atravessa o plano Z_1 é usada na determinação dos parâmetros do temporizador do PSB. Este temporizador tem que acomodar a oscilação estável mais rápida a que o sistema pode ser submetido, se o trip por perda de sincronismo para oscilações instáveis for requerido. Nem sempre é possível ajustar os elementos quadrilaterais e temporizadores para coordenar adequadamente, especialmente se a linha protegida for longa e fortemente carregada. Nesses casos, medidas especiais precisam ser tomadas para garantir a detecção correta de uma condição de oscilação.

O segundo método baseia-se na SCV e não é dependente de quaisquer impedâncias da linha ou da fonte do sistema (conforme mostrado na Seção IV). Portanto, este método não requer a execução de quaisquer estudos do sistema e, como tal, não requer nenhum ajuste definido pelo usuário.

Este artigo mostra que ambos os métodos dual-quadrilateral e SCV podem ser usados com sucesso para detectar uma oscilação de potência no sistema de potência. Usando casos de campo, o artigo também ilustra que para detectar com sucesso uma condição OOS usando o método dual-quadrilateral, o usuário tem que ajustar corretamente os parâmetros dos elementos quadrilaterais, enquanto o método SCV não requer que o usuário aplique ajustes no relé.

Concluindo, o método SCV permite que o usuário aplique com sucesso a detecção de oscilação de potência sem qualquer conhecimento da resposta dinâmica do sistema de potência.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. R. Mason, *The Art and Science of Protective Relaying*. John Wiley & Sons, New York, 1956.
- [2] N. Fischer, G. Benmouyal, and S. Samineni, "Tutorial on the Impact of the Synchronous Generator Model on Protection Studies," proceedings of the 35th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, outubro de 2008.
- [3] G. Benmouyal, D. Hou, and D. Tziouvaras, "Zero-Setting Power-Swing Blocking Protection," proceedings of the 31st Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, outubro de 2004.
- [4] D. Hou, S. Chen, and S. Turner, "SEL-321-5 Relay Out-of-Step Logic," SEL Application Guide (AG97-13), 2009. Disponível: <http://www.selinc.com>.

- [5] IEEE Power System Relaying Committee WG D6, "Power Swing and Out-of-Step Considerations on Transmission Lines," julho de 2005. Disponível: <http://www.pes-psrc.org>.
- [6] J. Mooney and N. Fischer, "Application Guidelines for Power Swing Detection on Transmission Systems," proceedings of the 32nd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, outubro de 2005.
- [7] F. Ilar, "Innovations in the Detection of Power Swings in Electrical Networks," Brown Boveri Publication CH-ES 35-30.10E, 1997.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Normann Fischer recebeu um Diploma Superior em Tecnologia, com louvor, da Witwatersrand Technikon, Johannesburg, em 1988, um BSEE, com louvor, da University of Cape Town em 1993, e um MSEE da University of Idaho em 2005. Ele ingressou na Eskom como técnico de proteção em 1984 e foi engenheiro de projetos sênior no departamento de projetos de proteção da Eskom por três anos. Em seguida, foi para a IST Energy como engenheiro de projetos sênior em 1996. Em 1999, ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. como engenheiro de sistemas de potência na divisão de pesquisas e desenvolvimento. Normann é um engenheiro profissional registrado na África do Sul e é membro do South Africa Institute of Electrical Engineers. Atualmente, ele é membro do IEEE e ASEE.

Gabriel Benmouyal, P.E., recebeu seu B.A.Sc. em Engenharia Elétrica e seu M.A.Sc em Engenharia de Controle pela Ecole Polytechnique, Université de Montréal, Canadá. Em seguida, ele começou a trabalhar na Hydro-Québec como especialista em instrumentação e controle. Trabalhou em diferentes projetos nas áreas de sistemas de controle de subestação e centros de despacho de carga. Em 1978, ele foi para a IREQ, onde sua principal área de trabalho foi a aplicação de técnicas digitais e microprocessadas para sistemas de proteção e controle de subestações de transmissão e geração. Em 1997, ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. como "principal engineer" de pesquisas. Gabriel é engenheiro profissional registrado na Province of Québec, é membro sênior do IEEE e atende ao Power System Relaying Committee desde maio de 1989. Ele detém mais de seis patentes e é autor e coautor de diversos artigos nas áreas de proteção e controle de sistemas de potência e processamento de sinais.

Daqing Hou recebeu seu BSEE e MSEE da Northeast University, China, em 1981 e 1984, respectivamente. Ele recebeu o PhD em Engenharia Elétrica e Computacional da Washington State University em 1991. Desde 1990, trabalha na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., onde ocupou diversas posições, incluindo engenheiro de desenvolvimento, engenheiro de aplicação, gerente de pesquisas e desenvolvimento, e "principal engineer" de pesquisas. Atualmente, ele é o diretor técnico de pesquisas e desenvolvimento para o Leste da Ásia. Seu trabalho inclui desenvolvimento de algoritmos avançados de proteção, processamento de sinais, modelagem e simulação de sistemas de potência. Seus interesses de pesquisas incluem sistemas lineares multivariáveis, identificação de sistemas e processamento de sinais. Daqing detém múltiplas patentes e é autor e coautor de vários artigos técnicos. Ele é membro sênior do IEEE.

Demetrios Tziouvaras recebeu um BSEE e um MSEE da University of New Mexico e Santa Clara University, respectivamente. Ele é membro sênior do IEEE e membro da Power Engineering Society, Power System Relaying Committee e CIGRE. Ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. em 1998 e atualmente ocupa a posição de engenheiro de pesquisas sênior. De 1980 até 1998, ele esteve na Pacific Gas and Electric, onde ocupou várias posições como engenheiro de proteção, incluindo a de "principal engineer" de proteção responsável pelas normas de projetos de proteção, novas tecnologias e automação de subestações. Ele detém múltiplas patentes e é autor e coautor de vários artigos técnicos apresentados em seminários de relés de proteção e no IEEE. Seu trabalho inclui o desenvolvimento de algoritmos avançados de proteção, modelagem e simulação de sistemas de potência.

John Byrne-Finley recebeu um BSEE e um MSEE com ênfase em sistemas de potência da University of Idaho em 2007 e 2009, respectivamente. Ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. em 2009 como "associate engineer" de sistemas de potência na divisão de pesquisas e desenvolvimento. John é coautor de vários artigos técnicos sobre sistemas de baterias e veículos elétricos e é membro ativo do IEEE.

Brian Smyth recebeu seu BS em engenharia geral com opção em elétrica e um MSEE da Montana Tech of the University of Montana em 2006 e 2008, respectivamente. Ele ingressou na Montana Tech como professor visitante em 2008 e ministrou classes sobre circuitos elétricos, máquinas elétricas, instrumentação e controles, e sistemas de potência. Ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. em 2009 como "associate engineer" de sistemas de potência na divisão de pesquisas e desenvolvimento. Brian é coautor de vários artigos técnicos sobre medição de impedância de baterias e é membro ativo do IEEE.